

Mats Heikkinen

Raideliikenteen aiheuttama rakenteiden värähtely

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.02.2019.

Työn valvoja:

Prof. Vesa Välimäki

Työn ohjaajat:

DI Timo Peltonen

TkT Henri Penttinen

Tekijä: Mats Heikkinen		
Työn nimi: Raideliikenteen aiheuttama rakenteiden värähtely		
Päivämäärä: 16.02.2019	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+125
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos		
Professuuri: Akustiikka ja äänenkäsittely		Koodi: ELEC3030
Valvoja: Prof. Vesa Välimäki		
Ohjaajat: DI Timo Peltonen, TkT Henri Penttinen		
<p>Tässä työssä keskitytään metron aiheuttamaan värähtelyyn maanalaisten tilojen välipohjissa. Työn tavoitteena oli selvittää Lauttasaaren metroaseman varavoimalaitetilan betonivälipohjarakenteen värähtelyominaisuuksia. Tilan vieressä liikennöivien metrojunien aiheuttama välipohjan värähtely mitattiin. Välipohjan kymmenen alinta ominaistajuutta ja mobiliteetit määritettiin mobiliteettimittausten ja Autodesk Robot-mallinnusohjelmiston avulla. Suurimman mitatun ohiajon nopeusvärähtelyn huippuarvo v_{peak} oli 0,64 mm/s ja sen taajuussisältö keskittyivät 80-125 Hz:n taajuusalueelle, jolloin rakenteiden vaurioitumisriskit ovat pieniä. Välipohjan alin ominaistajuus f_0 on noin 6 Hz. Pienin poikkeama menetelmien välillä ominaistajuuksien tapauksessa oli 0,01 Hz ja suurin 4,36 Hz poissulkien toiseksi alinta ominaistajuutta, jota mallinnus ei ennustanut. Mobiliteettien tapauksessa vastaavanlaiset amplitudit saavutettiin menetelmien kesken saman suuruusluokan herätteillä. Tulosten perusteella käytetyt menetelmät soveltuvat hyvin nykyisten ja uusien kohteiden värähtelyhaittojen arvioinnissa.</p>		
Avainsanat: akustiikka, värähtely, tärinä, runkomelu, raideliikenne, välipohja, mallinnus		

Author: Mats Heikkinen

Title: Railway Traffic Induced Vibration of Structures

Date: 16.02.2019

Language: Finnish

Number of pages: 9+125

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: Acoustics and Audio Technology

Code: ELEC3030

Supervisor: Prof. Vesa Välimäki

Advisors: M.Sc. (Tech.) Timo Peltonen, D.Sc. (Tech.) Henri Penttinen

This thesis focuses on the vibration induced by metros in floor slabs in underground spaces. The aim was to determine the vibrational properties of a concrete floor slab situated in Lauttasaari metro station's service facility. The vibration of the slab induced by nearby passing metro trains was measured. Moreover, the ten lowest natural frequencies and the mobilities of the slab were determined using mobility measurements and the modelling software Autodesk Robot. The highest velocity value v_{peak} measured due to metros was 0.64 mm/s and its prominent frequencies were 80-125 Hz, in which case the risk for structural damages are small. The lowest natural frequency f_0 of the slab is approximately 6 Hz. The smallest and largest deviations between the methods in terms of natural frequencies were 0.01 and 4.36 Hz, if the second lowest natural frequency, which the models could not obtain, is not regarded. In the case of mobilities, similar amplitudes were obtained using the methods for impulse forces of the same magnitude. Based on the results obtained, the methods used are suitable for the evaluation of vibration in current and future sites.

Keywords: acoustics, vibration, ground-borne noise, railway traffic, floor slab, modelling

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty syksyn 2018 aikana Länsimetro Oy:lle opinnäytteeksi Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoululle. Työn teon mahdollisti nykyinen työnantajani Akukon Oy, joka tuki työni valmistumista. Haluan erityisesti kiittää Länsimetro Oy:tä kiinnostavasta tehtävänannosta ja ainutlaatuisesta mahdollisuudesta laajentaa värähtelytekniillistä osaamistani. Yhteydenpito, työpalaverien järjestely ja tarvittavien taustatietojen saaminen onnistuivat sujuvasti koko työn ajan.

Ensiksi haluan kiittää työni valvojaa professori Vesa Välimäkeä erityisesti hyvistä tieteelliseen kirjoittamiseen liittyvistä neuvoista. Suuret kiitokset ohjaajilleni Timo Peltoselle ja Henri Penttiselle erinomaisesta ohjauksesta, erityisosaamisen jakamisesta ja kärsivällisyydestä. Kiitos myös Sakari Tervo ja muut kollegat Akukon Oy:ssä. Akukon tarjosi mm. tarvittavat työkalut ja mittauslaitteet työn mittauksille ja analyysille.

Lopuksi haluan kiittää Johannaa, äitiä, perhettä ja ystäviä tuesta, kärsivällisyydestä ja ymmärryksestä rajoitetusta ajasta teidän kanssanne menneen syksyn aikana.

Helsinki, 16.02.2018

Mats Heikkinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	viii
1 Johdanto	1
1.1 Tausta	1
1.2 Työn tavoitteet	1
1.2.1 Tutkimuskysymykset	2
1.3 Sisältö	2
2 Teoria	4
2.1 Värähtely	4
2.1.1 Värähtelyn perusteet	4
2.1.2 Vaimeneminen ja vahvistuminen	5
2.1.3 Kesto	7
2.2 Tärinä ja runkomelu	7
2.2.1 Vaikutus ihmiseen	8
2.3 Värähtely- ja äänipainesignaalien signaalianalyysi	8
2.3.1 Perusteet	8
2.3.2 Suodattimet	9
2.3.3 Aikapainotukset	10
2.3.4 Taajuuspainotukset	10
2.3.5 Oktaavi- ja terssikaistat	12
2.3.6 Kiihtyvyyssignaalin laskennallinen integrointi	13
2.3.7 Koherenssi	14
2.4 Rakenteiden värähtely	15
2.4.1 Värähtely kallio- ja maaperässä	15
2.4.2 Rakennusten perustuksien ja rakennusrungon värähtely	17
2.4.3 Värähtely välipohjissa ja väliseinissä	19
2.4.4 Värähtelyn leviäminen ja kytkeytyminen	21
2.4.5 Etäisyys- ja kerrosvaimennus	23
2.5 Raideliikenteen aiheuttama värähtelyheräte	24
2.6 Rakenteiden vaurioitumismekanismit	25
2.6.1 Väsytysmekanismi	26
2.6.2 Staattinen ylikuormitus	27
2.6.3 Rakenteen muodonmuutos	27
2.7 Rakennevaurioriskit	27
2.7.1 Standardit ja ohjeavot	27

2.8	Ihmisen kokema häiritsevyys	30
2.8.1	Värähtelyn tunnusluku	31
2.8.2	Standardit ja ohjearvot	32
3	Menetelmät	34
3.1	Mittaukset	34
3.1.1	Mittaus suureet	34
3.1.2	Kiihtyvyysanturit	34
3.1.3	Standardit ja ohjeet	35
3.1.4	Värähtelymittaukset	36
3.1.5	Mobiliteettimittaukset	36
3.2	Signaalianalyysi	37
3.2.1	Parametrit ja suureet	37
3.2.2	Aika- ja taajuusanalyysi	37
3.3	Mallinnus	37
3.3.1	Mallinnusmenetelmät	38
3.3.2	Värähtelyn empiiriset mallit	38
3.3.3	Runkomelun empiiriset mallit	40
3.3.4	Moodianalyysi	41
3.4	Haittojen arviointi	41
3.5	Värähtelyn tekniset torjuntakeinot	41
3.5.1	Kiskonhionta ja pyörien sorvaus	42
3.5.2	Kiskojen vaimennus	42
3.5.3	Vaimennusmatot	43
3.5.4	Kellutetut raidejärjestelmät	45
3.5.5	Torjuntatapojen tehokkuuden arviointi	45
4	Mittaukset	46
4.1	Mittausjärjestelyt	46
4.1.1	Mittaus tila	46
4.1.2	Mittalaitteisto	48
4.1.3	Mittaus pisteet	49
4.2	Välipohjan värähtelymittaukset	51
4.3	Välipohjan impulssivasaramittaukset	52
4.4	Tulokset	52
4.4.1	Värähtelyn huippuarvot	53
4.4.2	Terssispektrit	54
4.4.3	Spektrogrammit	59
4.4.4	Taajuusvaste- ja koherenssifunktiot	60
4.4.5	Ominaistaajuudet	62
5	Mallinnus	65
5.1	Mallit	65
5.2	Ominaistaajuudet	69
5.3	Taajuusvastefunktiot	69

5.4	Tulokset	70
5.4.1	Ominaistaajuudet	70
5.4.2	Taajuusvastefunktiot	71
6	Tulosten vertailu	74
6.1	Ominaistaajuudet	74
6.2	Taajuusvastefunktiot	75
6.3	Johtopäätökset	77
6.4	Menetelmien soveltuvuus nykyisten ja uusien kohteiden haittojen arviointiin	77
7	Yhteenveto	79
Liitteet		
A	Mittaustulokset	87
A.1	Nopeusvärähtelyn huippuarvot	87
A.2	Liikepoikkeaman huippuarvot	98
A.3	Spektrogrammit	109
B	Mallinnusparametrit	120
C	Mallinnustulokset - Taajuusvastefunktiot	122

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

a	värähtelykiihtyvyys [mm/s^2]
A	absorptiopinta-ala [m^2]
c	viskoosi vaimennuskerroin
c_p	puristusaallon etenemisnopeus [m/s]
c_s	leikkausaallon etenemisnopeus [m/s]
d	liikepoikkeama [mm]
d_{peak}	liikepoikkeaman huippuarvo [mm]
E	kimmokerroin [N/m^2]
f	taajuus [Hz]
f_0	alin ominaistajuus [Hz]
f_n	ominaistajuus [Hz]
f_s	näytteenottotaajuus [Hz]
G	leikkausmoduuli [Pa]
H	maaperän paksuus [m]
k	jäykkyys [N/m]
L_a	kiihtyvyytaso [$\text{dB re } 1 \mu\text{m/s}$]
L_A	A-painotettu ilmaäänitaso [$\text{dB re } 20 \mu\text{Pa}$]
L_{AS}	A- ja S-painotettu ilmaäänitaso [$\text{dB re } 20 \mu\text{Pa}$]
$L_{AS\text{max}}$	A- ja S-painotettu enimmäisäänitaso [$\text{dB re } 20 \mu\text{Pa}$]
L_p	äänipainetaso [$\text{dB re } 20 \mu\text{Pa}$]
L_{prm}	runkomelutaso [$\text{dB re } 20 \mu\text{Pa}$]
L_v	nopeustaso [$\text{dB re } 50 \text{ nm/s}$]
m	massa [kg]
S	pinta-ala [m^2]
T	jaksonaika [s]
T_s	näyteaika [s]
v	värähtelyn nopeus [mm/s]
v_{peak}	värähtelyn nopeuden huippuarvo [mm/s]
v_w	värähtelyn painotettu tehollisarvo [mm/s]
$v_{w,95}$	värähtelyn tunnusluku [mm/s]
ρ	tiheys [kg/m^3]
μ	Poissonin luku
ζ	vaimennussuhde
σ	jännitys [Pa]
ω	kulmataajuus [Rad/s]
ω_n	vaimentamaton ominaistajuus [Rad/s]
ω_d	vaimennettu ominaistajuus [Rad/s]

Lyhenteet

BEM	Boundary Element Method
ERB	Equivalent Rectangular Bandwidth
CLT	Cross-Laminated Timber
DTFT	Discrete-time Fourier Transform
FEM	Finite Element Method
FIR	Finite Impulse Response
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Frequency Response Function
HCF	High-cycle fatigue
IIR	Infinite Impulse Response
LCF	Low-cycle fatigue
rms	Root Mean Square, Tehollisarvo
STFT	Short-Time Fourier Transform

1 Johdanto

Viime aikoina rakennusosalalla on ollut selkeä trendi rakennuttaa liiketiloja, toimistoja ja asuinrakennuksia raideliikenteen päälle tai lähetyville, jolloin on tärkeää tutkia, voiko raideliikenteen värähtelyheräte häiritä ihmisiä tai mahdollisesti vaurioittaa rakenteita. Tässä työssä keskitytään metron aiheuttamaan värähtelyyn maanalaisten tilojen välipohjissa.

1.1 Tausta

Länsimetron jatkeen suunnittelussa pyydettiin Akukon Oy:tä selvittämään voidaan-ko maanalaisten asemien teknisten tilojen väliseinärakenteina käyttää muurattuja rakenteita nykyisten rakenteiden sijasta. Selvityksen taustana oli HKL:n (Helsingin Kaupungin Liikennelaitos) esittämä arvio jossa todettiin, että muuratut rakenteet eivät soveltuisi asemakäyttöön, koska metron tuottama värähtely voisi aiheuttaa rakenneaurioita rakenteissa.

Akukon Oy suoritti värähtelymittaukset 13.4.2018 Koivusaaren aseman teknisissä tiloissa. Tulokset osoittivat metrojen ohituksen aikaisen värähtelyn olevan niin pientä mitatuissa välipohjarakenteissa, ettei rakenneaurioriskejä syntyisi muuratuissa rakenteissa.

Selvityksen yhteydessä osapuolet sopivat, että metron värähtelystä teknisten tilojen välipohjarakenteissa voitaisiin tehdä laajempi selvitys, joka toisi lisätietoa nykyisten rakenteiden värähtelykäyttäytymisestä. Lisämittauksille nähtiin tarve, jolloin ensimmäisten mittausten tuloksille ja niiden perusteella tehdyille päätelmille saataisiin lisäluotettavuutta. Mittausten avulla saataisiin myös rakenteiden värähtelyominaisuuksista arvokasta lisätietoa. Värähtelyn mallinnustyökalujen soveltuvuus niin nykyisten kuin uusien kohteiden värähtelyn arvioinnissa nähtiin tärkeäksi. Miellenkiintoa herätti myös pitkäaikaisen ja toistuvan värähtelyn mahdollinen vaikutus rakenteisiin. Työ edistäisi lisäksi kaikkien osapuolien yleistä värähtelytekniistä osaamista ja ymmärrystä.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteina on selvittää metron aiheuttaman välipohjarakenteissa esiintyvän värähtelyn voimakkuus, taajuussisältö ja leviäminen sekä värähtelymittauksin että Autodesk Robot-mallinnusohjelmistoa käyttäen. Työn värähtelymittaukset suoritettiin Lauttasaaren asemalla 25.10.2018. Mittaus- ja mallinnustuloksia verrataan toisiinsa. Värähtelyn vaikutuksia tarkastellaan sekä rakenteellisten vaurioriskien että tiloissa oleskeleviin henkilöihin kohdistuvien värähtely- ja runkomeluhaittojen kannalta.

Tavoitteena on myös tarkastella mittaus- ja mallinnusmenetelmien keskinäistä soveltuvuutta ja mahdollisuuksia rakenteiden värähtelyn vaikutusten arvioinnissa. Työssä saadaan uutta systemaattista tietoa metroluikenteen värähtelyherätteen leviämisestä asemien maanalaisten tilojen betonirakenteissa, ja selvitetään mahdollisuuksia arvioida vastaavia kohteita tulevaisuudessa laskentamallinnuksen avulla. Tätä tietoa voidaan hyödyntää jatkossa esimerkiksi metroasemien suunnittelussa.

Työn lisätavoitteina on antaa yleisymmärrys raideliikenteen synnyttämän ja rakenteiden värähtelyn keskeisistä perusteista, joihin sisältyy niin värähtelyn vaimeneminen, vahvistuminen kuin kytkeytyminenkin sekä värähtely kallio- ja maaperissä, rakennuksen perustuksissa, rakennusrungossa, välipohjissa että väliseinissä. Lisäksi tarkastellaan keskeisiä rakenteiden vaurioitumismekanismeja ja rakenteiden vaurioitumiseen liittyviä värähtelyn ohjearvoja. Myös värähtelymittauksia, värähtelysignaalien peruskäsittelyä ja mallinnusmenetelmiä käsitellään, jotta voidaan antaa kokonaisvaltainen kuva aihepiiristä.

1.2.1 Tutkimuskysymykset

Työn tavoitteista saadaan johdettua seuraavat tutkimuskysymykset. Onko metron aiheuttama värähtelyheräte haitallista teknisten tilojen rakenteille? Toisin sanoen, miten suuret värähtelyn huippuarvot ovat metrojen ohiajojen aikana ja miten suuret ovat rakenteiden vaurioitumisriskit?

Yksi oleellista asioista värähtelyssä on sen taajuussisältö, jolloin yhdeksi kysymykseksi muodostuu: kykeneekö metron tuottama värähtely herättämään rakenteiden alimpia ominaistajuuksia? Tämän selvittämiseksi on tiedettävä niin metron herätteen taajuussisältö kuin myös värähtelyyn kohdistuvan rakenteen ominaistajuuudet.

Näistä tekijöistä johtuen yksi tärkeistä tutkimuskysymyksistä on vielä, mitkä ovat mitattavan rakenteen ominaistajuuudet. Nämä taajuudet voidaan selvittää niin mittauksin kuin mallinnuksen avulla. Tällöin on tärkeää selvittää mittaus- ja mallinnustulosten yhtenäisyydet ja eroavaisuudet. Keskeisiksi kysymyksiksi nousevat silloin, tuottavatko käytettävät mallinnusmenetelmät riittävän tarkkoja tuloksia ja voidaanko mallinnusta käyttää luotettavasti nykyisissä ja uusissa vastaavissa koh-teissa?

1.3 Sisältö

Työ alkaa kirjallisuuskatsauksella rakenteiden värähtelyn teoriasta. Teoriaosuudessa käsitellään värähtelyn perusteita, signaalianalyysiä, rakenteiden värähtelyä, raideliikenteen värähtelyherätteen syntymekanismeja, värähtelyn leviämistä rakenteisiin ja rakenteiden vaurioitumismekanismeja. Kappaleessa käsitellään myös rakennevaurio-riskeihin ja ihmisen kokemaan häiritsevyyteen liittyviä standardeja, tunnuslukuja ja ohjearvoja. Kappaleessa 3 tarkastellaan värähtelyn mittaus-, analyysi-, mallinnus- ja haittojen arviointimenetelmiä. Kappaleessa kerrotaan myös yleisiä raideliikenteen värähtelyn teknisiä torjuntakeinoja lähteen vaimentamiseksi.

Työn empiria- ja mallinnusosuus ovat kappaleissa 4 ja 5. Kappaleessa 4 syven-nyttään värähtelymittauksiin, joiden tarkoituksena oli selvittää ohiajavien metrojen aiheuttama värähtely Lauttasaaren metroaseman teknisen tilan välipohjarakenteessa sekä kyseisen rakenteen mobiliteetit sekä ominaistajuuudet. Näiden mittauksen järjestelyt ja tulokset raportoidaan. Mallinnuskappaleessa 5 käsitellään työn mallin-nustehtävät Autodesk Robot-mallinnusohjelmistoa käyttäen. Mallinnuksen tarkoi-tuksena on arvioida mitatun välipohjarakenteen ominaistajuuudet ja mobiliteetit.

Käytettyjä malleja, mallinnusparametreja ja tuloksia tarkastellaan kyseisessä kappaleessa.

Kappaleessa 6 vertaillaan kappaleissa 4 ja 5 esitettyjä tuloksia, joiden perusteella tehdään johtopäätökset, joissa pyritään vastaamaan työn tutkimuskysymyksiin. Kappaleessa tarkastellaan myös käytettävien menetelmien soveltuvuutta nykyisten ja uusien kohteiden haittojen arvioimisessa. Lopuksi kappaleessa 7 tehdään yhteenveto työstä ja pohditaan mahdollisen jatkotutkimuksen tarpeita.

2 Teoria

Tässä kappaleessa tarkastellaan värähtelyyn yleisesti liittyviä tekijöitä ja tämän työn kannalta oleellista teoriaa. Ensiksi käsitellään värähtelyn perusteita, jotka sisältävät yleisesti käytetyt suureet, värähtelyn keston luokituksen, värähtelyn vaimenemisen ja vahvistumisen. Ihmisen havaitsemaan tärinään ja runkomeluun tutustutaan osiossa 2.2. Osiossa 2.3 perehdytään värähtely- ja äänipainesignaalien signaalianalyysiin. Rakenteiden ja kallio- ja maaperän värähtely, sen leviäminen ja kytkeytyminen sekä etäisyys- että kerrosvaimennus esitellään osiossa 2.4. Raideliikenteen aiheuttamaan värähtelyherätteeseen tutustutaan osiossa 2.5. Värähtelyn kannalta oleellisia vaurioitumismekanismeja tarkastellaan osiossa 2.6 ja niihin liittyvät standardit ja ohjeavrot luetellaan osiossa 2.7. Lopuksi käsitellään ihmisen kokemaan häiritsevyyteen liittyviä objektiivisia mittareita ja tutkimustuloksia.

2.1 Värähtely

Värähtely on ulkoisen voiman aikaansaamaa väliaineen jaksollista liikehdintää tasapainoaseman ympärillä. Tässä työssä tarkastellaan erityisesti tilannetta, jossa kyseisen herätteen saa aikaiseksi raiteilla liikkuva juna.

2.1.1 Värähtelyn perusteet

Värähtelyä voidaan mitata ja kuvata monen eri suureen avulla. Kolme yleisintä suuretta ovat liikepoikkeama d (mm), värähtelynopeus v (mm/s) ja värähtelykiihtyvyys a (mm/s²) [1]. Olettaen ulkoisen voiman olevan harmoninen liikepoikkeamaa voidaan kuvata sinifunktion avulla [2]

$$d(t) = A \sin(2\pi f t + \phi), \quad (1)$$

missä A on amplitudi, f taajuus, t jaksonaika ja ϕ vaihe. Värähtelynopeus v voidaan johtaa derivoimalla liikepoikkeama ajan suhteen:

$$v(t) = \frac{dd}{dt} = A 2\pi f \cos(2\pi f t - \phi). \quad (2)$$

Värähtelykiihtyvyys a voidaan taas johdattaa liikepoikkeamasta toisen kertaluvun derivaatalla:

$$a(t) = \frac{d^2d}{dt^2} = -A 4\pi^2 f^2 \sin(2\pi f t - \phi). \quad (3)$$

Siniaallolle annetulla taajuudella f värähtelysuureita voidaan muuntaa keskenään seuraavien lausekkeiden avulla [3]:

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{(2\pi f)^2} a & d &= \frac{1}{2\pi f} v \\ v &= \frac{1}{2\pi f} a & v &= 2\pi f d \\ a &= 2\pi f v & a &= (2\pi f)^2 d. \end{aligned}$$

Monimuotoisille signaaleille muunnokset on suoritettava integroinnin ja derivoinnin avulla käyttämällä signaalien suodattamista. Värähtelytaajuus voidaan laskea hyödyntäen jaksonaikaa T tai aallonpituutta λ ja värähtelyn etenemisnopeutta v (m/s) väliaineessa käyttäen lauseketta:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda}. \quad (4)$$

Värähtelevän järjestelmän vaimentamaton alin ominaistajuus f_0 voidaan yleisesti laskea käyttäen lauseketta [4]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5)$$

missä m on järjestelmän massa (kg) ja k jäykkyys (N/m) [4]. Kaava 5 voidaan myös kirjoittaa muodossa [5]

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (6)$$

jossa ω_n on vaimentamaton ominaistajuus ilmaistu kulmataajuutena $2\pi f$.

2.1.2 Vaimeneminen ja vahvistuminen

Värähtelevissä rakenteissa vaimenemisella tarkoitetaan mekaanisen energian häviämistä. Useimmiten rakenteissa mekaaninen energia muuttuu lämpöenergiaksi. Energiahäviö on yhtä suuri kuin vaimennusvoiman tekemä työ. Vapaan värähtelyn tapauksessa vaimennus johtaa jatkuvaan amplitudin vaimenemiseen. Jatkuvan ja amplitudiltaan muuttumattoman värähtelyamplitudin ylläpitämiseksi on ulkoisen voiman jatkuvasti syötettävä energiahäviön suuruinen voima järjestelmään. [6]

Rakenteissa värähtelyn vaimeneminen voidaan jakaa sisäiseen ja ulkoiseen vaimennukseen. Materiaalivaimennus ja kontaktipinta-alat rakenteiden sisällä aikaansaavat sisäisen vaimennuksen. Materiaalivaimennus johtuu pääsääntöisesti hystereesistä (viskositeetti, kitka, jossain tapauksissa mahdollisesti väsymys). Suhteellinen liike rakenneosien välillä (liitokset yms.) aiheuttaa kontaktipinta-aloja rakenteiden sisällä. Ulkoinen vaimennus aiheutuu taas ulkopuolisesta kontaktista (ei-rakenteelliset elementit, energiasäteily maaperään yms.). [6]

Yhden vapausastejärjestelmän vapaata värähtelyä voidaan kuvailla käyttäen differentiaalista liikeyhtälöä [6]

$$m\ddot{d} + c\dot{d} + kd = 0, \quad (7)$$

missä c on viskoosi vaimennuskerroin, joka vaikuttaa värähtelyn vaimenemiseen. Viskoosi vaimennus kuvaa materiaalin sekä rakenteellisen vaimennuksen yhdistelmää [5]. Useasti todellisten rakenteiden vaimennus ei ole pelkästään viskoottista, mutta yleisesti ottaen pelkkää viskoottista vaimennuskerrointa voidaan käyttää riittävien tulosten saavuttamiseksi [6]. Mikäli $c = 0$ on järjestelmän ominaistajuus kaavan 5 mukainen. Jos $c > 0$ voidaan vaimennetun järjestelmän vaimennussuhde ζ määrittää käyttäen kaavaa [6]

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (8)$$

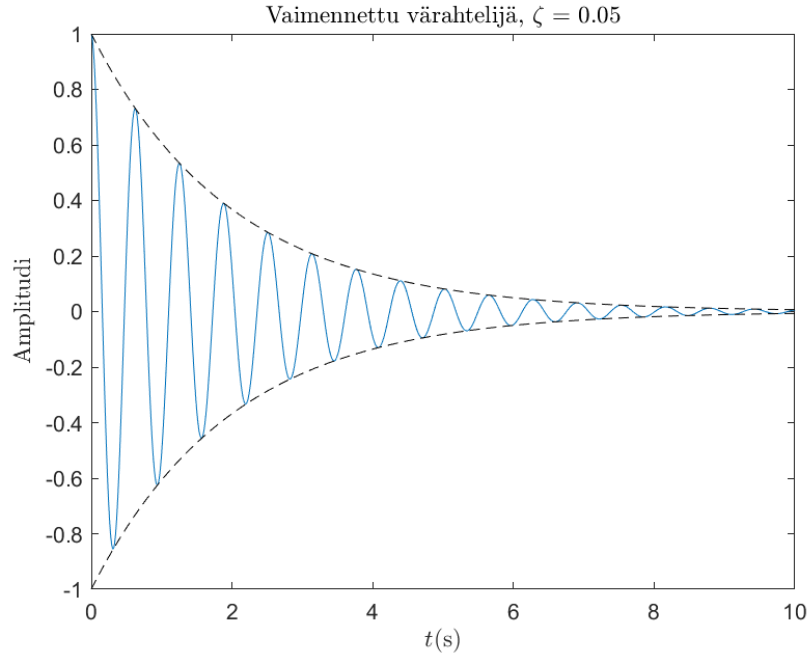
jossa suure $2m\omega_1$ on kriittinen vaimennuskerroin. Rakennustekniikassa on erittäin harvinaista, että $\zeta > 1$, jolloin tämän ehdon tutkiminen ei ole tarpeen tässä työssä [6]. Kun $\zeta < 1$ saadaan vaimennetun värähtelijän differentiaaliyhtälö

$$x(t) = Ae^{-\omega_n\zeta t} \sin(\omega_d t + \phi), \quad (9)$$

missä A on värähtelyamplitudi, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ on vaimennettu ominaistajuuus ja ϕ on vaihekulma [6][7]. Useimmiten rakenteissa vaimennus on pientä ($\zeta < 0,1$), jolloin $\omega_d = \omega_n$. Benaroya et al.:n [5] mukaan monien rakenteiden vaimennus on luokkaa $0,01 < \zeta < 0,20$. Lauseketta 5 voidaan siis käyttää ominaistajuuden arvioimiseksi monessa rakenteessa. Teräsbetonirakenteissa yleisesti käytetty vaimennussuhde on 0,05 (5%) [8]. Vertailun vuoksi, CLT-lattioille (Cross-laminated timber) vaimennussuhteeksi on ilmoitettu 0,025-0,035 (2,5-3,5 %) [9].

Kuvassa 1 näytetään kaavan 9 mukaisesti vaimennetun värähtelijän amplitudi-käyrä ajan suhteen, kun $\zeta = 0,05$, jolloin $\omega_d = \omega_n = 10$ rad/s, ja $\phi = \pi/2$ rad. Pakotetun värähtelijän tapauksessa ulkoinen voima $F(t)$ toimii herätteenä järjestelmässä, jolloin liikeyhtälö 7 saa muodon

$$m\ddot{d} + c\dot{d} + kd = F(t). \quad (10)$$



Kuva 1: Vaimennettu värähtelijä, $\zeta = 0,05$, jolloin $\omega_d = \omega_n = 10$ rad/s, ja $\phi = \pi/2$ rad.

Värähtelyn aiheuttama ulkoinen voima, eli värähtelyheräte voidaan luokitella seuraavasti [6]: harmoninen heräte, muu periodinen heräte, transientti heräte, stokastinen (satunnainen) heräte ja impulssiheräte. Raideliikenteen aiheuttamaa värähtelyherätettä tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 2.5.

Olellainen ilmiö liittyy värähtelyn leviämiseen ja kytkeytymiseen rakennuksissa on sen vahvistuminen resonanssi-ilmiön vaikutuksesta. Mikäli ulkopuolisen voiman synnyttämän herätteen merkittävimmät ja voimakkaimmat taajuudet vastaavat tai ovat lähellä maa- tai kallioperän, perustusten, rakennusrungon tai rakenteiden ominaistajuutta, rakenteisiin siirtyvä värähtelyamplitudi voi kasvaa jopa moninkertaisesti [10]. Connolly et al. [11] toteaa, että rakenteelliset resonanssit vahvistavat maaperäistä värähtelyä jopa yli 100 %, kun kyseessä on raideliikenteen aiheuttama värähtely.

2.1.3 Kesto

Värähtely voidaan karkeasti jakaa ajallisesti lyhyt- ja pitkäkestoiseen värähtelyyn. Standardin DIN 4150-3 [12] mukaan värähtely on pitkäkestoista, jos värähtelytahtuman aikana voi kehittyä resonanssia. Levomäen [2] mukaan raideliikenteen aiheuttamaa värähtelyä pidetään pitkäkestoisena eli jatkuvana, sillä sen kesto riittää pääsääntöisesti synnyttämään resonanssivärähtelyä.

2.2 Tärinä ja runkomelu

Tärinä ja runkomelu ovat kaksi ihmisen havaitsemaa värähtelyn muotoa, joille hän mahdollisesti altistuu. Ne voivat vaikuttaa ihmisiin, herkkiin laitteisiin tai pahimmillaan aiheuttaa rakenneaurioita. Tyypillisesti näitä mahdollisia vaikutuksia arvioidaan 1-500 Hz:n taajuusalueella värähtelevien rakenteiden matalien hallitsevien taajuuksien takia. Toissijaiset vaikutukset sisältä korkeataajuuksisen ilmapaineperäisen melun, jonka lähteenä toimivat yleensä ikkunat, alakatot, lamput yms., joiden äänentuottoa on vaikeata ennustaa. Lisäksi kyseisten äänilähteiden määrittäminen on haasteellista, vaikkakin ne voivat olla merkittävä häiritsevyyden lähde. [13]

Tärinällä tarkoitetaan värähtelyä, jonka ihminen aistii tuntoaistin välityksellä ja jolle ihminen altistuu. Runkomelulla tarkoitetaan matalataajuisia melua, joka on peräisin rakennusrunkoon kytkeytyneestä värähtelystä. Huonetilojen rakenteiden värähtelyä ei useimmiten aistita tuntoaistin välityksellä tärinänä. Värähtelevät pintarakenteet saavat kuitenkin ympäröivän ilman värähtelemään, jolloin syntyy kuultavaa melua. Toisin sanoen runkomelu on ilmapainetta, jonka äänipainetaso L_p määritetään lausekkeella

$$L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right), \quad (11)$$

missä p on äänipaine ja p_0 on referenssipaine $20 \mu\text{Pa}$, joka vastaa äänipainetta pienimmälle ihmisen kuulemalle äänelle [4]. Värähtelyn ohjearvot annetaan useimmiten nopeuden tai kiihtyvyyden arvoina, mutta kyseiset suureet voidaan myös ilmaista

desibelitasoina. Suureita käytetään erityisesti runkomelua arvioidessa. Kiihtyvyydestä voidaan ilmaista käyttäen

$$L_a = 20 \log \frac{a}{10^{-6}(\text{m/s}^2)}, \quad (12)$$

jossa L_a on kiihtyvyydestä (dB), a värähtelykiihtyvyys (m/s^2) ja 10^{-6} (m/s^2) referenssitaso värähtelykiihtyvyydelle. Nopeustaso voidaan taas ilmaista käyttäen

$$L_v = 20 \log \frac{v}{50 \times 10^{-9}(\text{m/s})}, \quad (13)$$

jossa L_v on nopeustaso (dB), v värähtelyn nopeus ja 50 nm/s referenssitaso värähtelyn nopeudelle. Referenssitasona voidaan myös käyttää 1 nm/s [14]. Huomioitavaa on, että kiihtyvyyden- ja värähtelytasot L_a ja L_v eivät suoraan ole vertailukelpoisia keskenään johtuen käytettävistä referenssitasoista ja eri suureiden välisestä taajuusriippuvuudesta. Tasot eivät myöskään ole vertailukelpoisia äänipainetasoon L_p .

Runkomelun häiriövaikutuksia arvioidaan useimmiten enimmäistasojen $L_{AS\text{max}}$ ja $L_{AF\text{max}}$ perusteella. Kyseiset suureet ovat taajuustasossa A-painotettuja (A), mutta myös aikatasossa painotettuja käyttäen slow- (S) tai fast- (F) aikavakioita. Painotuksien tarkoituksena on muuttaa tasosignaali vastaamaan ihmisen kuulon ominaisuuksia, jolloin mahdollisten haittojen arvioiminen on helpompaa. Signaalien aika- ja taajuuspainotukseen perehdytään tarkemmin osiossa 2.3.

2.2.1 Vaikutus ihmiseen

Tärinä voi aiheuttaa keskittymisongelmia, unihäiriöitä yms. [1]. Ihminen on erittäin herkkä tärinälle ja aistii suuret värähtelyamplitudit epämukavina. Epämukavuuden tunteen määrään ei ainoastaan vaikuta värähtelyamplitudi, vaan myös tärinän taajuus, suunta ja kesto. Tärinätasojen kasvaessa kognitiivinen suorituskyky voi laskea [7]. Runkomelun osalta vaikutukset ihmiseen ovat häiritsevyyden kannalta hyvin samankaltaiset kuin tärinän [15]. Osiossa 2.8 tarkastellaan tarkemmin ihmisen kokemaa häiritsevyyttä sekä siihen liittyviä objektiivisia mittareita ja tutkimustuloksia.

2.3 Värähtely- ja äänipainesignaalien signaalianalyysi

Tässä osiossa keskitytään olennaisiin signaalianalyysitekniikoihin värähtely- ja äänipainesignaalien osalta.

2.3.1 Perusteet

Jatkuvaa signaalia $x(t)$ voidaan esittää digitaalisesti diskreettinä eli epäjatkovana signaalina $x[n]$ näytteiden n avulla. Näytteenottotaajuus f_s määrittää näytteiden määrän per sekunti. Näyteväli T_s kuvaa aikaa näytteiden välillä ja voidaan määrittää lausekkeella:

$$T_s = \frac{1}{f_s}. \quad (14)$$

Nyquist–Shannon-teoreeman mukaan näytteenottotaajuus on oltava kaksi kertaa korkeampi kuin korkein alkuperäisestä signaalista tarkasteltava taajuus, kun laskeutumishäiriöt halutaan välttää. Värähtelysignaalien aikatasoanalyysin avulla voidaan laskea värähtelytapauksen huippu- sekä tehollisarvot. Signaalin huippuarvolla x_{peak} tarkoitetaan signaalin itseisarvoltaan suurinta arvoa. Signaalin tehollisarvo (rms, Root Mean Square) eli neliöllinen keskiarvo x_{rms} ajanhetkellä t_0 on matemaattisesti määritelty

$$x_{\text{rms}}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} [x(t)]^2 dt}, \quad (15)$$

missä T on analysoitava aikaikkuna [10]. Toisaalta on usein hyödyllistä analysoida värähtelysignaaleja taajuustasossa taajuussisällön arvioimiseksi. Muunnos aikatasta taajuustasoon perustuu Fourier’n muunnoksen käyttöön:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx, \quad (16)$$

missä ω on kulmataajuus $\omega = 2\pi f$. Fourier’n muunnos voidaan myös ilmaista aikadiskreetille signaalille $x[n]$ diskreettiaikaisena Fourier’n (Discrete-time Fourier Transform, DTFT) muunnoksena:

$$X_{2\pi}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-i\omega n}. \quad (17)$$

2.3.2 Suodattimet

Oleellinen osa signaalianalyysiä on signaalien suodattaminen käyttäen digitaalisia suotimia. Digitaaliset suotimet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: FIR (Finite Impulse Response) ja IIR (Infinite Impulse Response). Suodattamisen tarkoituksena on signaalien käsittely niin aika- kuin taajuustasossa. Tällöin järjestelmän taajuus- ja vaihevasteita voidaan muokata asettamalla kerto- ja yhteenlaskun sarjoja aikatastaan dataan [16]. Esimerkki suodatustoimeenpiteelle on vaimentaa annetun signaalin taajuuden f ylittävä tai alittava taajuussisältö.

FIR-suodattimet toimivat kertomalla nykyisen näytteen ja menneet näytteet suodinkertoimilla ja summaamalla niiden tulokset. Reaaliaikaisen lähtösignaalin näytteen arvo $y[n]$ voidaan ilmaista muodossa

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k], \quad (18)$$

missä b_k on k :nnen suodinkerroin, $x[n-k]$ on edeltävä tulonäyte ja M suodattimen kertaluku [16]. IIR-suodattamisessa reaaliaikaisen lähtönäytteen laskentaan käytetään aikaisempien tulonäytteiden lisäksi edeltäviä lähtönäytteitä, jolloin lähtönäyte $y[n]$ voidaan ilmaista lausekkeella [16]

$$y[n] = \frac{1}{a_0} \left[\sum_{j=0}^M b_j x[n-j] - \sum_{k=1}^M a_k y[n-k] \right]. \quad (19)$$

FIR-suodattimilla ollessa joitain etuja esimerkiksi, että ne ovat aina stabiileja ja niille voidaan suunnitella lineaarinen vaihe, niiden suurin haittapuoli on suuri suodinkertoimien tarvittava määrä [16]. Suuri määrä suodinkertoimia lisää suodattimen pituutta ja täten myös laskenta-aikaa. Analysoitavien värähtelysignaaleiden tapauksessa yleiset suodatustarpeet ovat sekä yli- ja alipäästösudatus että aika- ja taajuuspainotussuodatus.

2.3.3 Aikapainotukset

Kaksi yleisintä ja tärkeintä käytettyä aikapainotusta värähtelyn ja äänen kannalta ovat Slow- (S) ja Fast- (F) painotukset [17]. F-painotuksessa käytettävä aikavakio on 125 ms, joka vastaa ihmisen kuuloaistia, jolloin melun häiritsevyyttä ja enimmäistason äänekkyyttä voidaan arvioida. S-painotuksessa käytetään pidempää eli hitaampaa aikavakiota 1000 ms, jota käytetään kun äänitason nopeilla muutoksilla ei ole merkitystä [18]. Aikapainotus perustuu eksponentiaaliseen keskiarvoistamiseen, jolloin esimerkin vuoksi F-aikapainotettu signaali x_F voidaan ilmaista muodossa

$$x_F = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t x^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau_F} d\xi, \quad (20)$$

missä τ_F on eksponentiaalinen aikavakio F-painotukselle sekunneissa ja ξ on aikain-tegraalien osoitinmuuttuja [17]. Signaalin aikapainotus voidaan suorittaa suodattamalla signaali alipäästösudattimella, jossa yksi reaali napa on asetettu kohtaan $-1/\tau$, jossa aikavakio τ on RC-integraattorin aikavakio (125 tai 1000 ms) [17]. Digitaaliselle diskreetille signaalille suodatus voidaan toteuttaa IIR-suodattimella

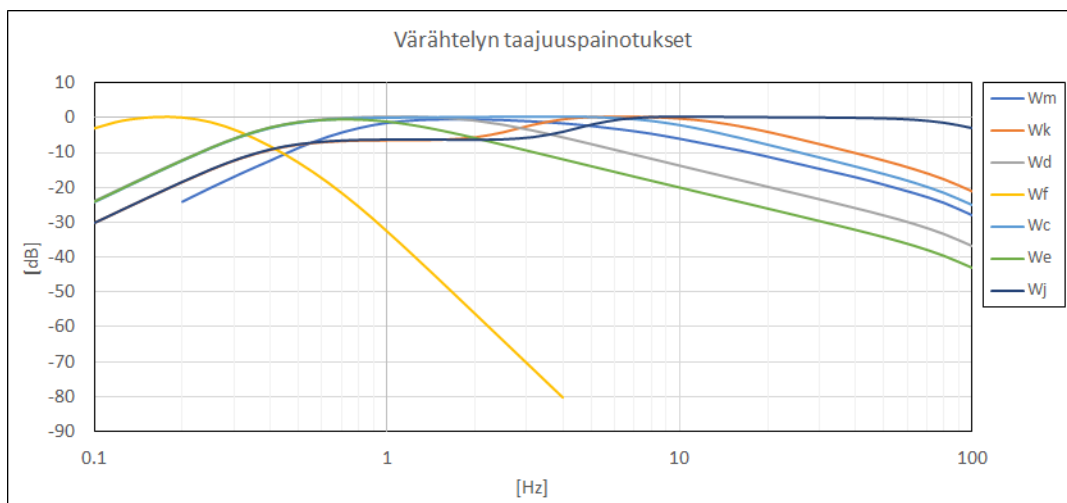
$$y[n] = (1 - \alpha)x[n] + \alpha y[n - 1], \quad (21)$$

missä

$$\alpha = e^{(-1/f_s\tau)}. \quad (22)$$

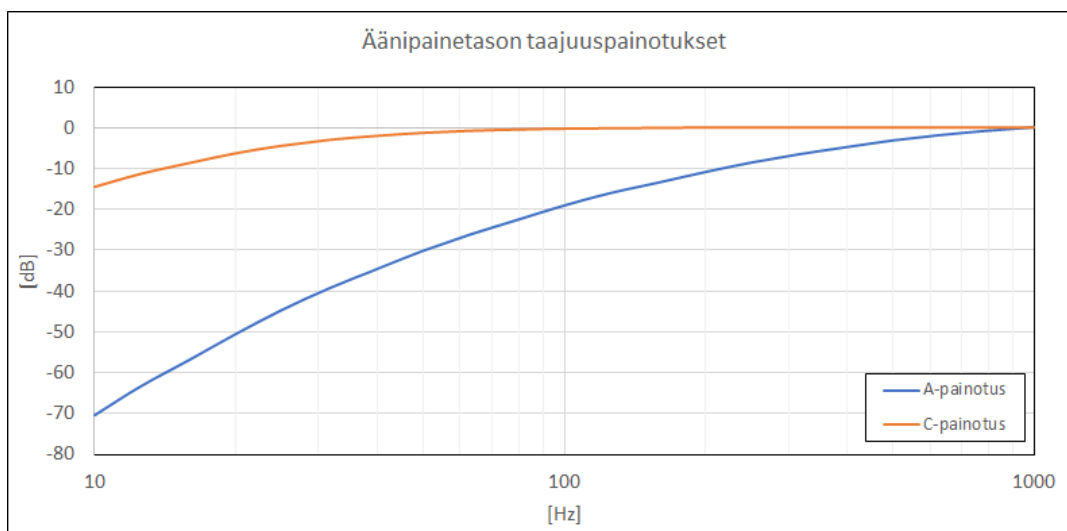
2.3.4 Taajuuspainotukset

Aikapainotuksen lisäksi niin värähtely- kuin äänipainetasosignaaleja voidaan taajuuspainottaa. Taajuuspainotettuja värähtelysignaaleja käytetään ihmiskehon koke-man värähtelyn arvioimiseen. Standardeissa ISO 2631-1 [19] ja ISO 2631-2 [20] on määritetty painotuksia eri tilanteisiin riippuen ihmisen kehon asennosta ja värähtelyn suunnasta. Pääasialliset ja suositellut värähtelyn taajuuspainotukset terveyden, mukavuuden ja häiritsevyyden arvioimiseksi ovat W_m , W_k , W_d ja W_f . Käytettyjä lisäpainotuksia ovat W_c , W_e ja W_j . Näistä käytetyin on W_m , sillä painotuksessa ei tarvitse ottaa huomioon ihmiskehon asentoa. Kyseistä painotusta tulisi käyttää taajuusalueella 1-80 Hz. Kuvassa 2 näytetään värähtelyn taajuuspainotukset. [19][20]



Kuva 2: Värähtelyn taajuuspainotukset. [19][20]

Ilmaäänien osalta yleisimmät käytettävät taajuuspainotukset ovat A- ja C-painotukset. Mainittavaa on, että painottamatonta signaalia kutsutaan myös Z-painotetuksi signaaliksi [17]. Taajuuspainotusta käytetään, jotta mitattu signaali voidaan suodattaa paremmin vastaamaan ihmisen kuuloaistin herkkyyttä erikorkuisille äänille [18]. A-painotettuja signaaleja käytetään yleisesti melumittauksissa, sillä se vastaa painotuksista parhaiten ihmisen kuuloaistia. Raideliikenteen kohdalla kyseistä painotusta käytetään myös runkomelun häiritsevyyden arvioimiseksi. Kuvaajassa 3 nähdään A-, ja C-painotuskäyrät. [18]



Kuva 3: A- ja C painotukset.

Värähtelysignaalien taajuuspainotukset voidaan suorittaa suodattamalla, jotka täyttävät standardeissa ISO 2631-1 ja ISO 2631-2 asetetut määritelmät ja vaatimukset. Äänipainesignaalien taajuuspainotuksen osalta käytetyt suodattimet tulisivat täyttää standardin IEC 61672-1 vaatimukset.

2.3.5 Oktaavi- ja terssikaistat

Taajuusanalyysissä voidaan hyödyntää Fourier'n muunnoksen lisäksi oktaavi- ja terssikaistasuodatusta, jolloin värähtelysignaalien taajuuskomponentteja voidaan tarkastella taajuuskaistoittain. Fourier'n muunnoksen taajuusresoluutio on oktaavi- ja terssisuodatusta parempi, mutta usein värähtelyn arvioinnissa pienempi resoluutio riittää, jos värähtely ei ole kapeakaistaista. Toisaalta Fourier'n muunnoksen aikaresoluutio on huono etenkin pidemmille signaaleille, mikäli edistyneempiä tekniikoita kuten vesiputouskäyriä tai spektrogrammeja, ei käytetä. Oktaavi- ja terssisuodatus mahdollistaa värähtelysignaalien taajuuskaistojen monipuolisen aikatason tarkastelun ja analyysin.

Niin äänipaine- kuin värähtelysignaalitkin voidaan suodattaa oktaavi- ja terssikaistoiksi. Terssikaista-analyysi vastaa karkeasti ihmisen kuuloaistia, kun taas oktaavikaista-analyysi on terssikaista-analyysistä redusoitu esitystapa. Psykoakustiikassa käytettyjä määreitä ovat mm. Zwickerin [21] ehdottama Bark-asteikko ja Mooren ja Glasbergin [22] ehdottama ERB-asteikko (Equivalent Rectangular Bandwidth), jotka vastaavat kuuloaistin kriittisiä kaistoja. Oktaavi- ja terssikaistojen taajuudet voidaan laskea 10-kantaisen järjestelmän avulla käyttäen $G_{10} = 10^{3/10}$ tai kaksikantaisen järjestelmän tapauksessa $G_2 = 2$ [23]. Kaistan tarkka keskitaajuus f_m voidaan laskea lausekkeella

$$f_m = G^{x/b} f_r, \quad (23)$$

missä b on 1 oktaavikaistoille ja 3 terssikaistoille, f_r on 1000 Hz ja x on kaistan numero [23]. Kaistan alempi rajataajuus f_1 lasketaan lausekkeesta [23]

$$f_1 = G^{-1/(2b)} f_m \quad (24)$$

ja ylempi rajataajuus f_2

$$f_2 = G^{1/(2b)} f_m. \quad (25)$$

Oktaavi- ja terssikaistat voidaan toteuttaa keski- ja rajataajuuksien laskemisen jälkeen sopivilla suodattamilla. Taulukossa 1 luetellaan 1-250 Hz:n oktaavikaistojen terssikaistojen nimelliset keskitaajuudet. [23]

Taulukko 1: 1-250 Hz:n oktaavi- ja terssikaistojen nimelliset keskitaajuudet. [23]

Keskitaajuus [Hz]	
Oktaavikaista	Terssikaista
1	1 1.25
2	1.6 2 2.5
4	3.15 4 5
8	6.3 8 10
16	12.5 16 20
31.5	25 31.5 40
63	50 63 80
125	100 125 160
250	200 250

2.3.6 Kiihtyvyyssignaalin laskennallinen integrointi

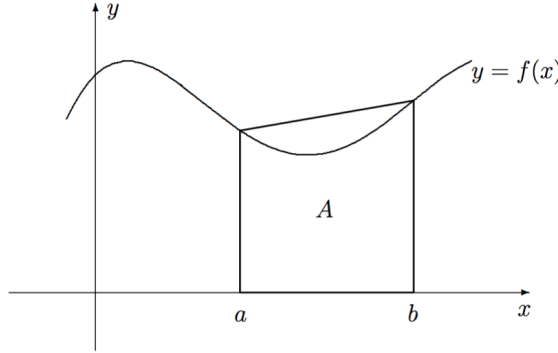
Integrointi voidaan suorittaa digitaalisessa ympäristössä käyttäen numeerisia integrointimenetelmiä, joissa integraali approksimoidaan äärellisenä summana:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^N w_i f(x_i), \quad (26)$$

missä w_i on kvadratuuripaino ja x_i kvadratuuripiste. Kvadratuurilla tarkoitetaan nelioimistä, jolla viitataan integraalin ja sen muodostaman pinta-alan väliseen yhteyteen [24]. Yksinkertaisimmat numeeriset kvadratuurit ovat keskipiste-, puolisuunnikas- ja Simpsonin säännöt, joista viimeinen on laskimissa ja tietokoneissa yleisesti käytetty numeerinen integrointimenetelmä. Tämän työn kiihtyvyyssignaaleiden integroinnissa käytetään puolisuunnikassääntöä, jota kutsutaan usein trapetsisäännöksi [24]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{2}(b-a)[f(a) + f(b)]. \quad (27)$$

Kuvassa 4 näytetään puolisuunnikassäännön pinta-alan approksimaatio funktiolle $f(x)$ pisteiden a ja b välillä. [24]



Kuva 4: Puolisuunnikassäännön pinta-alan approksimaatio. Kuva saatu viitteestä: [24].

Kappaleessa 2.1.1 esiteltyjen värähtelyn perussuureiden välisten suhteiden perusteella voidaan olettaa, että värähtelykiihtyvyys voidaan muuntaa onnistuneesti pelkän integroinnin avulla nopeusvärähtelyksi ja liikepoikkeamaksi. Integroitava signaali on syytä ylipäästösuodata, sillä DC-taajuudella (0 Hz) on suuri merkitys integrointitulokseen. DC-taajuuden aiheuttama mahdollinen amplitudipoikkeama korostuu etenkin integroinnin jälkeen. Jos poikkeamalla k on positiivinen amplitudi, saadaan

$$y(t) = k, \quad (28)$$

jolloin määräämättömän integraalin tulos on

$$\int y(t)dt = C + kt. \quad (29)$$

Integroinnin nähdään johtavan nousevaan janaan, joka on verrannollinen k :n suuruuteen. Pienikin DC-poikkeama voi täten johtaa suuriin muutoksiin integroidussa signaalissa. Alipäästön johdosta värähtelysignaalin DC-taajuus ja taajuuskomponentit alle päästötaajuuden vaimenevat. Tästä syystä päästötaajuus on valittava siten, että DC-taajuus saadaan suodatettua, mutta oleelliset tarkasteltavan värähtelytapahtuman taajuuskomponentit eivät vaimene.

2.3.7 Koherenssi

Koherenssinfunktion avulla voidaan tutkia järjestelmän tulo- ja lähtösignaalien välistä lineaarisuuden määrää. Koherenssifunktio on määritetty muodossa [25]

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{FX}(\omega)|}{G_{XX}(\omega)G_{FF}(\omega)}, \quad (30)$$

missä $0 \leq \gamma(\omega)^2 \leq 1$. Funktiolla G_{FX} on signaalien F ja X välinen ristispektri ja G_{XX} ja G_{FF} signaalien autospektrit. Koherenssifunktion tulos tulkitaan siten, että se ilmaisee lineaarisen suhteen määrän tulo- ja lähtösignaalien välillä taajuudella ω . Koherenssifunktion raja-arvo 1 kuvaa taustamelutonta mittausta, kun taas 0 kuvaa pelkkää kohinaa. Taajuuksilla, joilla signaalien välillä on heikko suhde, voidaan tulkita taustakohinaa lähtösignaalissa. Heikko suhde voidaan myös tulkita rakenteen ominaistajuuden aiheuttamana epälineaarisenä käyttäytymisenä. [25]

Teräsbetonirakenteissa epälineaarisuuksia ovat mm. Anamin ja Shoman [26] kuvailemat geometriset ja materiaaliset epälineaarisuudet. Geometrisen epälineaarisuuden aiheuttavat suuret muodonmuutokset ja niiden vaikutukset rakenteellisiin ominaisuuksiin. Materiaalinen epälineaarisuus taas johtuu materiaalin jännityksen ja rasituksen välisestä epälineaarisesta suhteesta.

2.4 Rakenteiden värähtely

Tässä kappaleessa keskitytään oleellisiin ilmiöihin liittyen rakenteiden värähtelyyn, kun värähtelyherätteenä toimii raideliikenne. Laajan aihepiirin rajaamiseksi tässä työssä keskitytään maanalaisiin tiloihin, jolloin maanpinnan värähtelyä ei oteta huomioon. Tyypillisesti rakenteiden värähtelyn hallitsevat taajuudet ovat alle 100 Hz, johtuen maa- ja kallioperän sekä rakenteiden taajuusvasteista. Myös herätteen spektrillä on suuri vaikutus hallitseviin taajuuksiin. [13]

Raideliikenteen aiheuttama ja ympäristöön leviävä värähtely aiheutuu pääsääntöisesti kiskojen ja pyörien epätasaisuuksista. Värähtely leviää kiskojen ja ratarakenteiden kautta kallio- ja maaperään, josta se kytkeytyy perustusten kautta rakennuksiin ja edelleen rakenteisiin. Värähtelyn leviämiseen, kytkeytymiseen, ja vahvistumiseen vaikuttavat monet osatekijät, joita tarkastellaan lähemmin tässä kappaleessa. Raideliikenteen aiheuttaman värähtelyherätteen suuruus riippuu monesta tekijästä mm. junakalustosta, sen nopeudesta ja ratarakenteista. Mikäli voimakas värähtely kytkeytyy rakenteisiin voi pahimmassa tapauksessa rakenteissa ilmetä vaurioita. Tämän työn keskittyessä maanalaisiin tiloihin kantavien ja välipohjarakenteiden oletetaan olevan betonirakenteita.

2.4.1 Värähtely kallio- ja maaperässä

Raideliikenteen synnyttämä värähtely etenee kallio- ja maaperässä runkoaaltoina, jotka voidaan jakaa kahteen erityyppiseen aaltoliikkeeseen. Ne ovat puristus- (P-aallot) ja leikkausaallot (S-aallot). Osa maapintaan osuvista aalloista taipuu ja muuttuu pinta-aalloiksi, joista tunnetuimmat ovat Rayleigh- (R-aallot), Love- ja Stoneley-aallot. Tämän työn keskittyessä maanalaisiin tiloihin pinta-aaltojen läpikäynti perusteellisemmin ei ole relevanttia. [2][27]

Puristusaallot aiheuttavat väliaineeseen puristumista ja venymistä, jolloin aineen hiukkasliike on etenemissuuntaista [28]. Puristusaallon etenemisnopeus c_p (m/s) väliaineessa voidaan ilmaista kaavalla

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 - 2\mu)(1 + \mu)}}, \quad (31)$$

missä E (Pa) on kimmokerroin, ρ (kg/m³) väliaineen tiheys ja μ Poissonin luku [42]. Leikkausaalloissa väliaineen hiukkasliike on kohtisuoraista etenemissuuntaan nähden aiheuttaen leikkausjännitystä. S-aallon etenemisnopeus c_s (m/s) väliaineessa voidaan laskea käyttäen yhtälöä [27]

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}}, \quad (32)$$

missä G (Pa) on leikkausmoduuli. Kaavoista 31 ja 32 voidaan todeta väliaineen ominaisuuksien vaikuttavan suuresti värähtelyn etenemisnopeuteen, kun väliaineen oletetaan olevan homogeeninen. Todellisuudessa kallioperässä esiintyy rakoilua, joka hidastaa runkoaaltojen etenemisnopeutta sekä aiheuttaa vaimenemista, jota käsitellään kappaleessa 2.4.5. Aaltoliikkeen etenemiseen kallioperässä vaikuttavat mm. kivilaji, sen tiheys, huokoisuus ja vesipitoisuus. [1][27]

Yleisesti aaltoliikkeen eteneminen on maaperässä huomattavasti hitaampaa kuin kallioperässä, johtuen pienemmästä kimmokertoimesta. Nopeuteen vaikuttaa maalajin karkeus, jonka kasvaessa myös sen tiheys kasvaa [27]. Taulukossa 2 ilmenee puristus- ja leikkausaaltojen etenemisnopeudet eri maapohjatyypeissä [29][30]. Maalajit voidaan jakaa viiteen aliryhmään, joita kutsutaan hyvin pehmeiksi, pehmeiksi, sitkeiksi, koviksi ja hyvin koviksi [10]. Värähtelykomponentit, joiden taajuudet ovat lähellä maaperän ominaistajuutta välittyvät pisimmän matkan [27]. Savimaiden ominaistajuudet ovat useimmiten 5-15 Hz ja kovemmillä moreenimailla 10-25 Hz [10]. Pehmeän maaperän alin ominaistajuus voidaan arvioida käyttäen lauseketta

$$f_0 = \frac{c_s}{4H}, \quad (33)$$

missä H on maaperän paksuus metreinä [6][31]. Aaltoliikkeen kohdatessa kallio- ja maaperän rajapinnan aalto heijastuu ja taittuu aiheuttaen muutoksia sen kulkureitissä, nopeudessa ja taajuussisällössä. [27]

Taulukko 2: Puristus- ja leikkausaallon etenemisnopeudet eri maapohjatyypeissä. [29][30]

Maapohjatyyppe	Etenemisnopeus [m/s]
Puristusaallon etenemisnopeus c_p	
Hiekka	600
Siltti	600
Sora	600
Savi	1500
Kallio	3500
Leikkausaallon etenemisnopeus c_s	
Pehmeä savi	50-120
Sitkeä savi, löyhä heikka tai siltti	100-200
Tiivis hiekka tai siltti, löyhä sora	150-250
Tiivis sora tai moreeni, kova savi	200-500
Kallio	>700

2.4.2 Rakennusten perustuksien ja rakennusrungon värähtely

Rakennuksen perustus on maata vasten tuleva tukirakenne, jolle rakennuksen paino kohdistuu. Perustusten tehtävänä on kestää ja siirtää rakennuksen aiheuttamat rasitukset kallio- ja maaperään ilman että maa rakennuksen alla pettäisi. Perustustapoja on erilaisia riippuen lähinnä maaperästä ja rakennustyyppistä. Rakennusrunko sisältää rakennuksen kantavat rakenteet, jotka kantavat rakennuksen painon ja kestävät ulkopuoliset rasitukset. Runko välittää kuormat perustukseen ja siitä edelleen maahan.

Kallio- ja maaperän värähtely etenee rakennuksen perustuksiin, joista edelleen rakennusrungon kautta rakenteisiin. Perustuksiin siirtyvän värähtelyn suuruus riippuu kytkennästä kallio- tai maaperän ja perustusten välillä eli perustustyyppi vaikuttaa suuressa määrin värähtelyn etenemiseen. Useimmiten värähtely vaimenee siirtyessään perustuksiin kytkentähäviön takia. Sen suuruus vaihtelee 2 ja 15 dB:n välillä. Toisaalta on tapauksia, joissa kytkentähäviön voidaan olettaa olevan 0. Esimerkiksi maavaraisten laatat altistuvat saman tyyppisiin värähtelyihin kuin maaperä, jolloin kytkentähäviö laatan ominaistajuuden alittaville taajuuksille on 0. Suoraan kallioperän päälle perustettuihin rakennuksiin ei synny kytkentähäviötä. Taulukossa 3 annetaan värähtelyn perusarvot v_0 perustuksessa eri maa- ja kallioperille perustetuille rakennuksille. [1][32][33]

Taulukko 3: Värähtelyn perusarvot rakennusten perustuksissa eri maa- ja kallioperissä. [34]

Maa-/ Kallioperä	Pehmeä savi	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekk	Tiivis hiekka, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
Värähtelyn perusarvo v_0	5 (mm/s)	7 (mm/s)	10 (mm/s)	12 (mm/s)
Värähtelyn hallitseva taajuus	<10 Hz	10-20 Hz	20-50 Hz	>50 Hz

Värähtelyn edetessä rakennusrungossa pystysuuntainen värähtely vaimenee vaakasuuntaista värähtelyä enemmän, sillä rakennus on vähemmän jäykkä vaakasuunnassa. Näin ollen rakennusrungon värähtely on pääsääntöisesti vaakasuuntaista. Asuinrakennusten vaakasuuntaiset ominaistajuudet ovat tyypillisesti alle 10 Hz, mikä on samalla taajuusalueella kuin pehmeiden maaperien ominaistajuudet. Raideliikenteen värähtely sijaitsee tällä samalla taajuusalueella, jonka johdosta resonanssi-ilmiö voi olla merkittävä rakenteissa. [1][31]

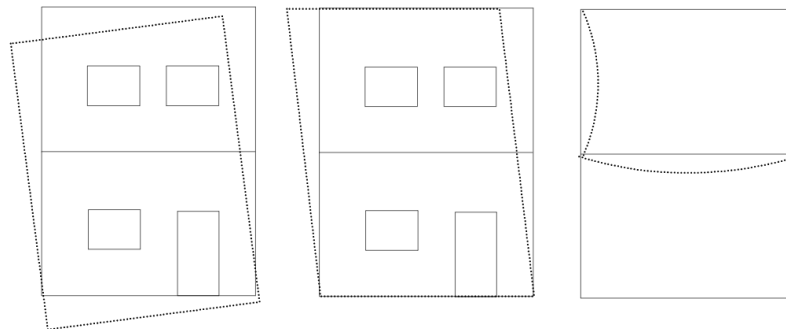
Taulukossa 4 nähdään rakenteiden ominaistajuudet Leventhallin [35] mukaan. Toisaalta VTT toteaa, että välipohjien ominaistajuudet voivat myös olla huomattavasti matalampia [10][36]. Esimerkiksi suuremmissa liiketiloissa sekä toimistorakennuksissa, joissa välipohjien jännevälit ovat pitkiä, välipohjarakenteiden ominaistajuudet ovat matalia.

Taulukko 4: Rakenteiden ominaistajuuudet [35]

Rakenne	Ominaistaajuus Hz
Pilarit	5-50
Välipohjat	10-30

Jos yksikerroksista rakennusrunkoa kuvataan tasomallilla, värähtely voidaan yksinkertaistaa massa-jousijärjestelmäksi. Tällöin massa m muodostuu katon massasta ja jäykkyys k seinien tai muiden jäykistävien rakenteiden leikkausjäykkyydestä. Ominaistaajuus voidaan tällöin arvioida käyttäen kaavaa 5. [31]

Monikerroksisissa rakennuksissa massa keskittyy useisiin eri tasoihin, jolloin rakennusrungolla on useita ominaismuotoja, joissa tasot liikkuvat eri suuntiin. Kuvassa 5 näytetään esimerkkejä rakennusrungon ominaismuodoista. Alimman ominaistaajuuden värähtelymuoto esiintyy silloin, kun massat liikkuvat samaan suuntaan. Värähtelymuodot voivat myös olla monimutkaisempia, jolloin rakennuksen eri osien värähtelymuodot yhdistyvät. [31]



Kuva 5: Esimerkkejä rakennusrungon ominaistaajuuksista. Kuva saatu viitteestä: [10]

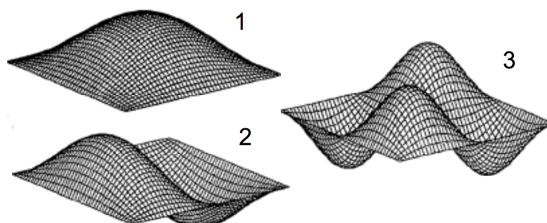
Taulukossa 5 näytetään kerrosten lukumäärän vaikutus rakennuksen ominaistaajuuteen. Taulukkoa tulisi tulkita siten, että merkillä x merkityt solut edustavat taa-juusaluetta, jolle rakennusrungon ominaistaajuus tyypillisesti sijoittuu. Taulukosta nähdään miten kerrosten lisääminen alentaa ominaistaajuutta.

Taulukko 5: Rakennuksen kerrosten lukumäärän vaikutus ominaistaaajuuteen. [36]

Kerrosten lukumäärä	Terssikaistan keskitaajuus								
	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10
1-2						x	x	x	x
3				x	x	x	x		
4			x	x	x	x			
5		x	x	x	x				
6-7	x	x	x	x					
8	x	x	x						
9-10	x	x							

2.4.3 Värähtely välipohjissa ja väliseinissä

Perustuksen ja rakennusrungon pystyrakenteiden pystysuuntaiset värähtelyt siirtyvät rakennuksen välipohjiin. Välipohjilla on useita värähtelymuotoja, jotka heräävät herätteen taajuussisällöstä riippuen. Muotojen lukumäärään vaikuttaa lattian pituus- ja poikittaissuuntaisen jäykkyyden ero [10]. Useimmiten alimpia ominaistaaajuuksia vastaavat värähtelymuodot ovat kiinnostuksen kohteena rakenteiden vaurioitumisen kannalta, sillä välipohja on näillä taajuuksilla löysin ja liikepoikkeama on suurin. Korkeilla ominaistaaajuuksilla välipohja on jäykempi ja värähtelee rakenteellisesti huonommin, mutta runkomelun kannalta nämä taajuudet ovat merkittäviä. Kuvassa 6 näytetään laattarakenteen kolmen alimman ominaistaaajuuden värähtelymuodot.



Kuva 6: Laattarakenteen kolmea alimpaa ominaistaaajuutta vastaavat värähtelymuodot. [36]

Liikepoikkeama välipohjarakenteilla voidaan olettaa olevan suurinta keskellä laattaa, sillä alinta ominaistaaajuutta vastaavalla värähtelymuodolla on kupu välipohjan keskikohdassa, joka nähdään kuvasta 6. Koska välipohjat ovat useimmissa tapauksissa päistään ja reunoistaan tuettuja tai kiinnitettyjä voidaan olettaa, että nämä kohdat ovat solmupisteitä, joissa liikepoikkeamaa ei esiinny. Kupupisteissä taas liikepoikkeama on suurin. Toisaalta värähtelyherätteen taajuussisältö vaikuttaa suuresti, jos välipohjan alimmat ominaistaaajuudet ja värähtelymuodot pääsevät heräämään. Tällöin suurin liikepoikkeama ei välttämättä ilmene alimmalla ominaistaaajuudella.

Välipohjat voidaan luokitella yksi- ja kaksisuuntaisiin välipohjiin riippuen välipohjan dimensioista. Jos $l/b > 2$ on välipohja yksisuuntainen ja $l/b < 2$ niin se

on kaksisuuntainen. l on tässä tapauksessa pidempi ja b lyhyempi jänneväli. Yksisuuntaiset välipohjat ovat palkeilla kahdesta päästä tuettuja, jolloin päätukea on yhteen suuntaan. Kaksisuuntaiset välipohjat ovat taas kaikilta reunoiltaan tuettuja palkeilla, jolloin päätukea on välipohjan molemmissa suunnissa. Kaksi yleistä välipohjien tuentatapaa on nivel ja jäykkä tuenta. Nivelletut ja jäykästi tuetut välipohjat vastustavat pysty- ja vaakasuuntaisia voimia, mutta jäykkä tuenta vastustaa myös momenttia.

Lattian ominaistajuus $f_0 = 10$ Hz jakaa lattiat matala- ja korkeataajuuksiin lattioihin [37]. Alimpaan ominaistajuuteen f_0 , joka tyypillisesti vaihtelee 3-30 Hz välillä välipohjasta riippuen, vaikuttaa pääsääntöisesti jänneväli, tyyppi ja maaperän pystyvärähtely. Mitä suurempi jänneväli, sitä matalampi ominaistajuus f_0 . Myös välipohjan materiaalin ominaisuudet mm. massa, jäykkyys ja vaimennus vaikuttavat suuresti taajuuteen. Kevyiden puu- tai teräsrunkoisten välipohjien ominaistajuus f_0 on yleensä 8-30 Hz, kun jänneväli on 3-8 metriä ja vaimennus 3-7 %. Raskaammille ontelolaatoille pidemmällä jänneväleillä ominaistajuus f_0 on tyypillisesti 6-20 Hz. Pitkäjänteisten ja raskaiden teräsbetonilaattojen alin ominaistajuus on yleensä alhainen, 3-8 Hz. Raskaiden välipohjien vaimennus on useimmiten välillä 2-4 %. [10][36]

Useimmiten välipohjien värähtely on voimakkainta kovilla savimailla tai paksuilla hiekkamailla herätetaajuuden ollessa yleensä yli 10 Hz, jolloin resonanssi-ilmiö on mahdollinen. Pehmeiden savimaiden kohdalla resonanssia voi ilmetä pitkäjänteisillä massiivilaatoilla.[31]. Alimman ominaistajuuden laskennallinen arviointi on yleisesti helposti arvioitavissa, mikäli kyseessä on yksinkertainen suorakaiteen muotoinen välipohja- tai seinärakenne. Taajuus voidaan arvioida päistään nivelletuuna palkkina käyttäen lauseketta [37]:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_1}{m}}. \quad (34)$$

Lausekkeessa l on välipohjapalkin/elementin pituus, $(EI)_1$ on välipohjan pituutta vastaava jäykkyys ja m on välipohjan massa pinta-alayksikköä kohden, johon on lisätty hyötykuorma osuudella 30 kg/m². Lausekkeen 34 käyttöön sisältyy tosin ehtoja. Annetaan muuttujan b olla välipohjan leveys ja $(EI)_b$ leveyttä b vastaava jäykkyys. Lauseke 34 aliarvioi ominaistajuutta enintään 5 %, kun $\frac{b}{l} > 1,0$ ja $\frac{(EI)_1}{(EI)_b} > 30$. Toisaalta kun $\frac{b}{l} = 0,5$ päästään samaan tarkkuuteen kun $\frac{(EI)_1}{(EI)_b} > 200$. Mikäli yllä esitetyt ehdot eivät täyty, arvioidaan alin ominaistajuus suorakaiteen muotoiselle lattia-alueelle/välipohjalle, joka on tuettu kaikilta reunoilta lausekkeella [37]

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_1}{m}} \sqrt{1 + [2(\frac{1}{b})^2 + (\frac{1}{b})^4] \frac{(EI)_b}{(EI)_1}}. \quad (35)$$

Lausekkeissa 34 ja 35 ilmenevä jäyhyysmomentti I (m⁴) voidaan laskea käyttäen [38]

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (36)$$

missä h on välipohjan paksuus/korkeus. Betonivälipohjissa kimmokerroin voidaan määrittää analyttisesti kaavalla

$$E_{cm} = \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}, \quad (37)$$

missä f_{cm} on betonin keskimääräinen lieriölujuus 28 vuorokauden iässä. Mikäli välipohjan omapainosta johtuva suurin poikkeama δ_{max} , on tiedossa, voidaan alin ominaistajuus arvioida omapainomenetelmää käyttäen. Välipohjan jäykkyys k voidaan tällöin määrittää [39]

$$k = \frac{mg}{\frac{3}{4}\delta_{max}}, \quad (38)$$

missä m on värähtelevän järjestelmän massa, g painovoima ja $\frac{3}{4}\delta_{max}$ keskimääräinen poikkeama. Kaavasta 5 saadaan tällöin johdettua lauseke ominaistajuudelle [39]

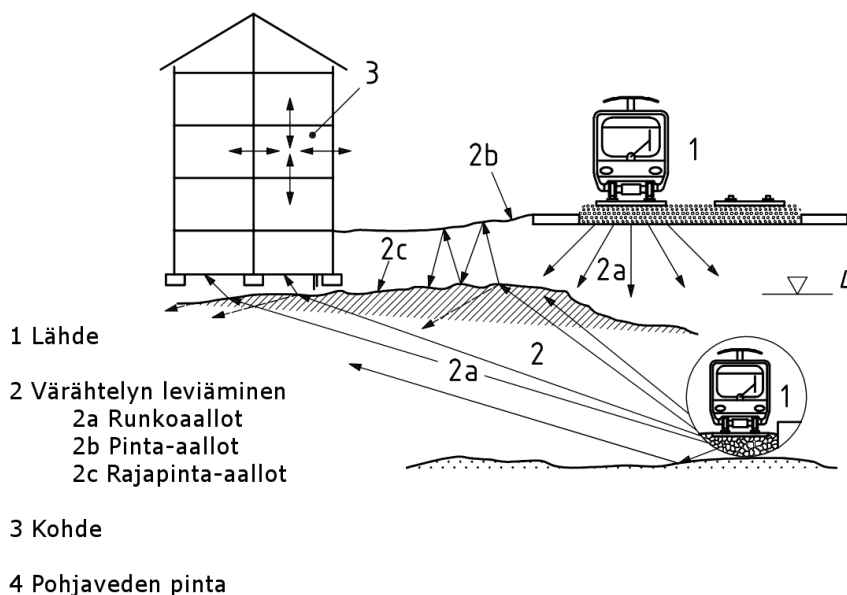
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4g}{3\delta_{max}}} = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\delta_{max}}}. \quad (39)$$

Väliseinät Väliseinillä voi joissakin tapauksissa olla jäykistävä eli parantava vaikutus välipohjan värähtelyyn. Etenkin kevyiden väliseinien ja korkeataajuuksisten lattioiden kohdalla voi parannusta ilmetä yhden värähtelyluokan verran. Parannus on suurin silloin, kun väliseinärakenne sijaitsee poikittain lattiapalkistoon nähden ja sen lattian pituussuuntaiset reunat ovat tuettu. Merkittävimmät tekijät väliseinän parantavassa vaikutuksessa ovat väliseinän leikkausjäykkyys ja välipohjan ja väliseinän välisen liitoksen jäykkyys. Väliseinän leikkausjäykkyyteen vaikuttavat mm. rakennusmateriaalit, kiinnittimet ja väliseinän aukot. Välipohjan ja väliseinän välisen liitoksen jäykkyyteen vaikuttaa erityisesti rakenteiden paikallinen joustavuus liitoksen läheisyydessä. Toisaalta väliseinien merkityksen arviointi on laskelmallisesti haastavaa, joten kokemuseräistä tietoa on käytettävä suunnittelussa. [37]

VTT:n tiedotteessa 2425 [37] todetaan: “Suunnittelussa on huomioitava, että värähtelyamplitudit, joihin väliseinän tulisi vaikuttaa, ovat suuruudeltaan vain millimetrin kymmenesosia ja että väliseinän jäykistävän vaikutuksen tulee säilyä myös jatkuvan käytön aikana”.

2.4.4 Värähtelyn leviäminen ja kytkeytyminen

Raideliikenteen värähtelyheräte leviää ratarakenteista maa- ja kallioperän kautta rakennuksen perustuksiin ja niistä edelleen rakennusrunkoon ja yksittäisiin rakenteisiin. Mitä jäykempi kytkentä on rakenteiden välillä, sitä paremmin värähtely leviää rakenteesta toiseen. Kuvassa 7 nähdään raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn leviämistiet läheiseen rakennukseen.



Kuva 7: Raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn leviäminen ja kytkeytyminen rakennukseen. Kuva mukailtu viitteestä: [13].

Maa- ja kallioperästä perustuksiin siirtyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttaa moni eri tekijä. Päätekijät ovat maa- ja kallioperä, perustamistapa ja rakennus. Maa- ja kallioperän värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö vaikuttavat suuresti siihen paljonko värähtelyä leviää perustuksiin. [31]

Perustamistapa sekä perustusten jäykkyys ovat myös merkittäviä tekijöitä. Pystypaalutus ei vaimenna merkittävästi perustukseen tulevaa vaakavärähtelyä, jos rakennuksen sokkeli jää maan alle vaikka rakennus olisi massiivinen ja riittävästi eristetty maaperästä. Vinopaalutukseen ei estä maaperän ja paalujen kautta siirtyvää vaakavärähtelyä. Vaakavärähtelyn siirtyminen on hyvin tapauskohtaista ja se riippuu rakennuksen ja maaperän välisestä vuorovaikutuksesta. [31]

Rakennuksen vaakadimensiot ja massa määrittävät myös perustuksiin siirtyvän värähtelyn suuruuden. Nyrkkisääntönä pidetään, että mitä massiivisempi rakennus on kyseessä, sitä suurempi on maaperän värähtelyvaimennus. Perustuksista rakennusrunkoon siirtyvän värähtelyn suuruuteen taas vaikuttavat perustusten värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö sekä rakennusrungon että välipohjan dynaamiset ominaisuudet. Rakennuksen kantavien seinien ollessa hyvin jäykkiä pystysuunnassa siirtyvät myös perustuksen pystysuuntaiset värähtelyt lähes saman suuruuksina rakennuksen eri kerroksiin. Tällöin kantavien seinien pystyvärähtely toimii välipohjien herätteenä. [31]

Rungon ja välipohjan dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat jäykkyys, massa ja vaimennus, joista kaksi ensimmäistä taas vaikuttavat rungon sekä välipohjan ominaistajuuteen [31]. Resonanssi-ilmiöön liittyvä tekijä on suurennuskerroinmenetelmä, jonka avulla voidaan karkeasti arvioida rakennuksessa esiintyvien pysty- ja vaakasuuntaisten värähtelyjen mahdollinen voimistuminen. Kyseistä VTT:n kehittämää menetelmää voidaan käyttää, jos rakenteiden värähtelymittauksia ei ole

suoritettu tai tarkempaa värähtelyn taajuussisällön resonanssitarkastelua ei tehdä. Toisaalta menetelmä vaatii maaperän värähtelymittauksia. [36]

Suurennuskerroinmenetelmää käyttäen voidaan värähtelyn huippuarvo v_B laskea käyttäen [36]

$$v_B = k_B v_G, \quad (40)$$

missä k_B on värähtelyn suurennuskerroin ja v_G maaperän värähtely. Suurennuskerroin riippuu tarkasteltavasta rakenteesta ja värähtelyn suunnasta. Suositukset suurennuskertoimille ilmenevät taulukossa 6. [36]

Taulukko 6: Kaavassa 40 käytettäviä suurennuskertoimia. [36]

Rakennusosa	Värähtelyosa	Suurennuskerroin k_B
Perustus	Kaikki suunnat	1,0
Maanvarainen lattia	Kaikki suunnat	1,0
Alapohja, paaluperustus	Vaakasuunta	1,5
Ala- ja välipohjat	Pystysuunta	3,0
Kattotaso, enintään 2 kerrosta	Vaakasuunta	3,0
Kattotaso, 3-4 kerrosta	Vaakasuunta	2,0
Kattotaso, yli 4 kerrosta	Vaakasuunta	1,0

Etenkin pehmeillä maa-alueilla on resonanssin merkitys suuri. Maaperän värähtelyenergian esiintyessä kapealla taajuuskaistalla voi rakennusrungon tai välipohjan ominaistajuuudet osua kyseiselle taajuusalueelle. Kovissa maaperissä värähtelyn hallitsevat taajuudet ovat yli 10 Hz ja värähtely laajakaistaista. Tällöin vaakasuuntainen värähtely ei yleensä voimistu rakennusrungossa ($k_B = 1$) ja välipohjissakin voimistumisen voidaan olettaa olevan vähäistä ($k_B = 1,5$). Rakennukseen siirtyvän värähtelyn suuruus tulisi aina olettaa olevan vähintään yhtä suurta kuin maaperässä, vaikka värähtely voikin todellisuudessa vaimeta rakennukseen siirtyessään. [36]

2.4.5 Etäisyys- ja kerrosvaimennus

Värähtelyaallon edetessä väliaineessa osa aallon energiasta häviää ympäröivään väliaineeseen. Tällöin puhutaan aallon vaimenemisesta. Vaimeneminen voidaan yleisesti jakaa geometriseen ja materiaalin vaimennukseen. Rakenteiden värähtelyn kohdalla voidaan vaimeneminen myös jakaa pystysuuntaiseen ja vaakasuuntaiseen vaimennukseen eli etäisyys- ja kerrosvaimennukseen. Geometrinen vaimennus johtuu aaltojen leviämisestä niiden edetessä materiaalin läpi. Tämän tyyppinen vaimennus riippuu aaltotyypistä, mutta on taajuudesta riippumaton. Materiaalivaimennus taas johtuu energiahäviöistä aallon etenemässä materiaalissa useimmiten kitkan takia. Aallon energia laskee eksponentiaalisesti ja vaihtelee eri materiaalien välillä. [1]

Dobrin ja Savit [40] yhdistivät geometrisen ja materiaalivaimennuksen, jolloin kokonaisvaimennus homogeeniselle materiaalille voidaan ilmaista muodossa

$$A = A_1 \frac{r_1}{r} e^{\alpha(r-r_1)}, \quad (41)$$

missä A on amplitudi etäisyydellä r ja A_1 on amplitudi etäisyydellä r_1 . Absorptio-kerroin α määritetään lausekkeesta

$$\alpha = \frac{\pi f}{Qc}, \quad (42)$$

missä Q on materiaalin laatukerroin, f on tarkasteltava taajuus ja c on etenevän aallon nopeus. Mitä suurempi arvo kertoimella Q on, sitä paremmat ovat materiaalin vaimennusominaisuudet. Värähtelyn pystysuuntaista vaimenemista rakennuksessa voidaan arvioida käyttäen kerrosvaimennusta, joka arvioi 3dB:n vaimennuksen per kerros käyttäen lauseketta [1][29]

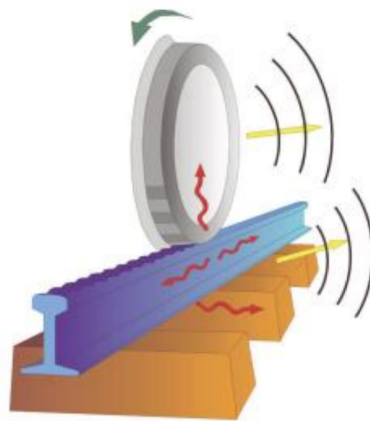
$$L_p = L_g - 3n, \quad (43)$$

missä L_g on maaperän värähtelytaso tai runkomelutaso ja n kerrosten määrä.

2.5 Raideliikenteen aiheuttama värähtelyheräte

Kappaleessa 2.1.2 todettiin ulkoisen voiman toimivan värähtelyherätteenä ja esitettiin miten herätteet voidaan luokitella. Raideliikenteessä herätteen voidaan olettaa olevan stokastista ja aikarajoitettua. Herätteen taajuussisällön laajuudesta riippuen puhutaan myös kapea- tai laajakaistaisesta herätteestä. Kapeakaistainen värähtelyheräte sisältää vain kapealla taajuusalueella olevia värähtelykomponentteja [10], kun taas laajakaistainen heräte sisältää taajuuskomponentteja paljon leveämmältä taajuusalueelta. Raideliikenteen tapauksessa heräte on laajakaistaista.

Raideliikenteessä herätteenä toimii kiskolla kulkeva juna. Heräte aiheutuu pääsääntöisesti pyörien ja kiskojen välisistä epätasaisuuksista. Vaikka epätasaisuuksia ei esiintyisi, värähtelyä voi syntyä junan akselien aiheuttamasta liikkuvasta kuormasta rataa [41][42]. Kuvassa 8 nähdään kiskon ja pyörän epätasaisuuksien aiheuttama herätemekanismi. Mekanismi synnyttää kiskon ja ratarakenteiden värähtelyn lisäksi myös ilmaaääntä.



Kuva 8: Kiskon ja pyörän epätasaisuuksien aiheuttama herätemekanismi. Kuva saatu viitteestä: [43].

Värähtelyherätettä voidaan tarkastella myös värähtelyjärjestelmänä, joka muodostuu junasta, raiteesta sekä maasta. Järjestelmän värähtelyherätteen suuruuteen ja taajuussisältöön vaikuttavat monet erilaiset sekä pysyvät että muuttuvat osatekijät [28]. Junan osalta olennaisia tekijöitä ovat mm.: telivälit, kuorman suuruus, nopeus, akselipaino, junan dimensiot ja rakenne, ja pyörien ja kiskon epätasaisuudet [28][42].

Nykyisellä metrolinjalla liikennöi M100-, M200- ja M300-sarjan junia. Junatyypeille on erilaiset telivälit ja kokoonpanot, joten niiden herätteet ovat oletetusti myös erilaisia. Sutela [42] tutki nopeuden (40-70 km/h) vaikutusta värähtelyherätteeseen. Työssä todettiin värähtelyamplitudin voimistuvan ja värähtelyn hallitsevan taajuuden nousevan vauhdin kasvaessa. Värähtelyn suuruuden ja nopeuden välillä vaikutti olevan lineaarinen yhteys, vaikka kyseisen työn mittauskohteessa havaittiin värähtelyhuippu alle junan maksiminopeuden. Toisaalta työssä pohdittiin, jos värähtelyhuipun taajuus osui jonkin värähtelykomponentin ominaistajaudelle, joka vahvistaisi värähtelyä. Ratarakenteen kannalta vaikuttavia tekijöitä ovat mm.: ratavallin geometrinen muoto, ratavallin rakenne, perustamistapa, raiteen laatu (epätasaisuudet), värähtelyn kohteena oleva rakenne, epäjatkuvuuskohdat (mm. vaihteet), kaarteet ja ratapölkkyt. [28][42]

Lakušić ja Ahac [44] arvioivat kiskojen epäjatkuvuuskohtien poistamisen vaimentavan värähtelytasoa 0-5 dB. Myös maa- ja kallioperän ominaisuuksilla on vaikutuksensa järjestelmän värähtelyherätteeseen [28]. Värähtelyherätteeseen vaikuttavia tekijöitä on paljon, mistä voidaan päätellä herätteen mallinnuksen olevan haasteellista.

2.6 Rakenteiden vaurioitumismekanismit

Tässä osiossa tarkastellaan raideliikenteen kannalta oleellisia rakenteiden vaurioitumismekanismeja. Rakenteiden vaurioitumisella tarkoitetaan vaurioita, jotka heikentävät rakennuksen tai rakenteiden eheyttä ja käytettävyyttä. Yleisimmät syyt rakennevaurioille ovat lämpövaikutukset, kosteuden aiheuttamat laajentumiset, pehmeiden maaperien painuminen ja routavauriot. Joissakin tapauksissa voi värähtely myös aiheuttaa vaurioita. [1][35]

Materiaalin väsymyksen ollessa yleisin tunnettu värähtelyn aiheuttama heikentävä mekanismi keskitytään tässä kappaleessa pääsääntöisesti kyseiseen ilmiöön. Värähtelevä mekaaninen rakenne voi myös käytännössä pettää muista syistä, esimerkiksi yhdestä tai muutamasta liiallisesta värähtelyhuipusta tai tietyn värähtelytason jatkuessa ajallisesti liian kauan. Värähtelyn mahdolliset vaurioitumismekanismit voidaan jakaa kolmeen alikohtaan [45]:

1. Normaali väsymys - vaurioituminen tapahtuu tietyn ajankohdan jälkeen, joka riippuu värähtelyjaksojen lukumäärästä ja niiden huippuarvoista.
2. Vaurioituminen tapahtuu, jos $a(t)$ on korkeampi kun asetettu rajataso a_0 tietyn ajan verran.
3. Vaurioituminen tapahtuu kun $a(t)$ ylittää rajatason a_0 .

Suosittelut värähtelyn raja-arvot vaikuttaisivat pätevän etenkin alikohtien 2 ja 3 vaurioitumismekanismeihin, sillä vertailukohteina ovat värähtelyn huippu- ja raja-arvot. Etenkin pitkäaikaisen värähtelyn kannalta väsymysmekanismeja on syytä pohtia, sillä metrojunien aiheuttamat värähtelytasot maanalaisissa tiloissa pysyivät alle annettujen raja-arvojen. Rakenteiden tulisi sietää vuosikymmenten ajan säännöllisesti liikennöiviä junia.

2.6.1 Väsymysmekanismi

Komponenttiin vaikuttava toistuva jaksollinen kuormitus voi aiheuttaa väsymysvaurioita, vaikka kuormatasot alittaisivat selvästi materiaalin äärimmäisen kestävyysarvon. Vauriot voivat ilmetä näennäisesti turvallisten jännitystasojen sisällä. Jaksojen lukumäärä, joka aiheuttaa vaurioita, riippuu vaikuttavan jakson suuruudesta ja materiaalin kapasiteetista, joka mekanismissa tarkoittaa materiaalin väsymyskestävyyttä. Tyypillisesti materiaalit pettävät väsymyksen takia $10^3 - 10^7$ jakson jälkeen. Käytännön sovelluksissa monet järjestelmät ja niiden komponentit kohdistuvat värähtelyn aiheuttamalle jaksolliselle kuormitukselle. Niin kauan kuin jaksollisen kuorman aiheuttama vaihteleva jännitys on suhteellisen pieni järjestelmässä, vaurioita esiintyy vasta erittäin monen jakson jälkeen. [46]

On olemassa kaksi lähestymistapaa komponentin väsymyselinkaaren laskemismenetelmille. Ensimmäinen on ns. "continuum approach" (jatkumo lähestymistapa) ja toinen on murtumamekanismi. Ensimmäinen lähestymistapa käsittelee materiaalia jatkumona, jossa väsymysvauriot kertyvät ja jotka lopulta johtavat rakenteen vaurioitumiseen. Murtumamekanismi lähestymistapa taas tarkastelee materiaalin halkeamia epäjatkuvuuksina ja käyttää halkeamien käyttäytymistä lähtökohtana materiaalin eliniälle. [46]

Usein matalajaksollinen väsymys (LCF, low-cycle fatigue) ja korkeajaksollinen väsymys (HCF, high-cycle fatigue) erotellaan toisistaan. On olemassa kaksi tapaa näiden kahden mekanismin erottamiseen. Ensimmäinen tapa huomioi pelkästään jaksojen määrän komponentin pettämiseen, joka useimmissa tapauksissa on määritetty olevan 10^6 . Toisaalta jaksojen määräksi on myös ilmoitettu 10^4 [47], joka osoittaa LCF:n ja HCF:n erittelyn jaksojen määrän perusteella olevan hyvinkin mielivaltaista. [46]

Parempi tapa eritellä väsymystyyppit on ottaa huomioon sovelletun kuorman tyyppi. Jos maksimaalinen jännitys kuormajaksojen aikana ei ylitä materiaalin väsymysjännitystä, on epämuodostuminen täysin elastista ja mekanismi on sen myötä HCF. Jos jonkin verran plastista rasitusta kehittyy kuormajakson aikana, väsymysjännityksen ylittävästä jännityksestä johtuen, mekanismi on LCF. HCF:ssa kuormituksen suuruutta kvantifioidaan käyttämällä jännitysalueita $\Delta\sigma$. Plastisen epämuodostumisen aikana jännitys ei juurikaan lisäännä, jonka myötä LCF:ssä kuormitus määritetään käyttämällä rasitusalueita $\Delta\epsilon$. [46]

Todennäköisyys on pieni, että raideliikenteen värähtelyn aiheuttama väsymysmekanismi vaurioittaisi rakenteita. Värähtelyn aikaansaama komponenttijännitystasojen nouseminen voidaan pitää suhteellisen nimellisenä ja komponenttiin kohdistuva jaksojen määrä toistuvalla korkealla värähtelytasolla on suhteellisen pieni. [48]

2.6.2 Staattinen ylikuormitus

Staattinen ylikuormitus tapahtuu, kun materiaaliin kohdistettu voima joka ilmaistaan mekaanisena jännityksenä, ylittää materiaalin staattisen kestävyys. Staattinen kestävyys tai vetolujuus on materiaalin ominaisuus, joka muodostaa järjestelmän tai sen komponentin kuormaa kantavan kapasiteetin. [46]

2.6.3 Rakenteen muodonmuutos

Jossain tapauksessa materiaalin liiallinen muodonmuutos ilman murtumaa voi johtaa rakenteiden vaurioitumiseen. Ulkoiset kuormitukset eli tässä työssä raideliikenteen aiheuttama värähtelyheräte saa aikaiseksi muodonmuutosta ja jännitystä värähtelyyn kohdistuvan rakenteen materiaalissa. Muodonmuutos voi olla elastista tai plastista. Niin kauan kuin muodonmuutos on rajoitettua, häviää se myös, kun kuormitus poistuu. Tämän prosessin nimi on elastinen muodonmuutos, joka on täysin palautuva prosessi. Plastinen muodonmuutos syntyy, kun taivutuksen aiheuttava jännitys ylittää materiaalin myötörajan eikä se enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa. [46]

2.7 Rakenneaurioriskit

Raideliikenteen aiheuttamaan värähtelyyn liittyvät rakenneaurioriskit ovat useimmiten pienet. Toisaalta voimakas värähtely voi aiheuttaa halkeamia niin kantavissa kuin muissa rakenteissa [49]. Raiteiden taipuminen voi aiheuttaa rasisusta lähellä oleviin rakennuksiin. Mikäli rakennuksen tai sen rakenteiden ominaistajuudet ovat lähellä raideliikenteen ja maa- tai kallioperän ominaistajuutta, voi resonanssi-ilmiö vahvistaa värähtelyamplitudia moninkertaisesti ja täten voivat rakenteet vaurioitua. Joissakin maaperissä saattaa värähtely aiheuttaa painumista maaperässä, mikä lisää vaurioitumisriskejä. Toisaalta metroasemien kallioiloissa ei maaperän painumista tapahdu. [1][50]

Rakenneauriot voidaan jakaa kolmeen kategoriaan Leventhallin [35] mukaan. Vähäiset vauriot ovat muutaman millimetrin levyiset halkeamat rappauksissa. Merkittävät vauriot sisältävät jopa 10 mm leveät halkeamat seinissä. Kolmas kategoria on vakavat vauriot, jotka ovat noin 25 mm leveät halkeamat ja jotka voivat johtaa rakennuksen tuhoutumiseen. Rakennuksen ikä, kunto, koko, väsymysominaisuudet ja rakennetyypit määrittävät pääsääntöisesti mikäli vaurioita pääsee syntymään [1].

Värähtelyn aiheuttaman rakenneaurioriskien arvioimiseksi on 1-500 Hz:n taajuusalue merkityksellisin, vaikkakin suurimmat rasitteet korkeammilla rakennerisikeillä liittyvät useimmiten matalille taajuuksille. Suurin osa keinotekoisien lähteiden aiheuttamista rakenneaurioista ilmaantuvat 1-150 Hz:n taajuusalueella. [13]

2.7.1 Standardit ja ohjeavot

Mahdolliset värähtelyyn liittyvät rakenneaurioriskit voidaan arvioida käyttämällä eri standardeissa annettuja ohjeavot. Rakenteiden kestävyttä värähtelylle arvioi-
dessa vertailuarvona käytetään yleisesti taajuuspainottamatonta värähtelynopeuden

huippuarvoa v_{peak} (mm/s) [31]. Standardin DIN 4150-3 [12] mukaiset lyhytaikaisen värähtelyn ohjearvot ilmenevät taulukosta 7.

Taulukko 7: Standardin DIN 4150-3 antamat ohjearvot värähtelynopeudelle arvioitaessa lyhytaikaisen värähtelyn vaikutuksia rakenteisiin [12]

Rakennustyyppi	Ohjearvot värähtelynopeudelle v (mm/s) perustuksissa taajuuksilla		
	1-10 Hz	10-50 Hz	50-100 Hz*
Liiketilat ja rakenteellisesti vastaavat rakennukset	20	20-40	40-50
* Yli 100 Hz:n taajuuksilla annetut arvot voidaan käyttää minimiarvoina			

Standardissa DIN 4150-3 annetaan myös ohjearvoja pitkäaikaisen värähtelyn osalta, jotka luetellaan taulukossa 8. Standardin arvot on määritelty värähtelynopeudelle v rakennuksen ylimmässä kerroksessa vaakasuuntaiselle värähtelylle kaikilla taajuuksilla. [12]

Taulukko 8: Standardin DIN 4150-3 mukaiset ohjearvot pitkäaikaiselle värähtelylle ylimmässä kerroksessa. [12]

Rakennustyyppi	Ohjearvo vaakasuuntaiselle värähtelynopeudelle v (mm/s) ylimmässä kerroksessa
Liiketilat ja rakenteellisesti vastaavat rakennukset	10
Asuinrakennukset ja rakenteellisesti vastaavat rakennukset	5
Värähtelylle herkät rakennukset	2,5

Taulukossa 9 näytetään rakennustapakertoimella skaalatut värähtelyn ohjearvot v eri rakenteille [34][36]. Skaalatut ohjearvot lasketaan lausekkeella

$$v = F_k v_0, \quad (44)$$

jossa F_k on rakennustapakerroin ja v_0 värähtelyn perusarvo. Värähtelyn perusarvo v_0 on raja-arvo, jolla tavanomaisiin ja hyväkuntoisiin rakennuksiin ei yleensä aiheudu vauriota [36].

Taulukko 9: Värähtelyn rakenneustapakertoimella skaalatut värähtelyn ohjearvot rungon ja välipohjan värähtelynopeudelle. [36][34]

Rakenneluokka	Rakennus- tapakerroin F_k	Rakennustapakertoimella skaalatut värähtelyn ohjearvot v rungon ja välipohjan värähtelylle [mm]						
	terssikaista [Hz]	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
2. Teräsbetoniset teollisuusrakenteet, ruiskubetonoidut kalliotilat	1,50	6	7,5	9,5	12	15	18,8	24
3. Pilariperustuksille rakennetut elementtirakenteiset teräsbetonirakenteet	1,20	4,8	6	7,6	9,6	12	15	19,2
4. Tiili- ja kevyt- soraharkkorakenteet, ruiskubetonimattomat kalliotilat	1,00	4	5	6,3	8	10	12,5	16
5. Kevytbetoni- ja kalkkihiekkatiili- rakenteet, värähtely- herkät vanhat rakennukset	0,65	2,6	3,3	4,1	5,2	6,5	8,1	10,4

Standardissa BS 7385-2 on myös annettu ohjearvoja kosmeettisia vaurioita aiheuttavalle, pääsääntöisesti lyhytkestoiselle ja ohimenevälle värähtelylle, joka ei aiheuta resonanssi-ilmiötä rakenteissa. Taulukossa 10 luetellaan standardin ohjearvot eri rakenne- ja rakennustyypeille. Lisäksi standardissa mainitaan, että vahvistamattomien rakenteiden, kevyiden runkorakenteiden, asuin- ja kevyiden liikerakennusten tapauksissa liikepoikkeaman ei tulisi ylittää 0,6 mm alle 4 Hz:n taajuuksilla. Huomioitavaa on, että viitatus arvot koskevat rakennuksen pohjan värähtelyä. Jos rakenteiden dynaaminen kuormitus aiheutuu jatkuvasta värähtelystä, joka saa resonanssit heräämään, taulukon raja-arvoja voidaan joutua pienentämään jopa 50 %. [48]

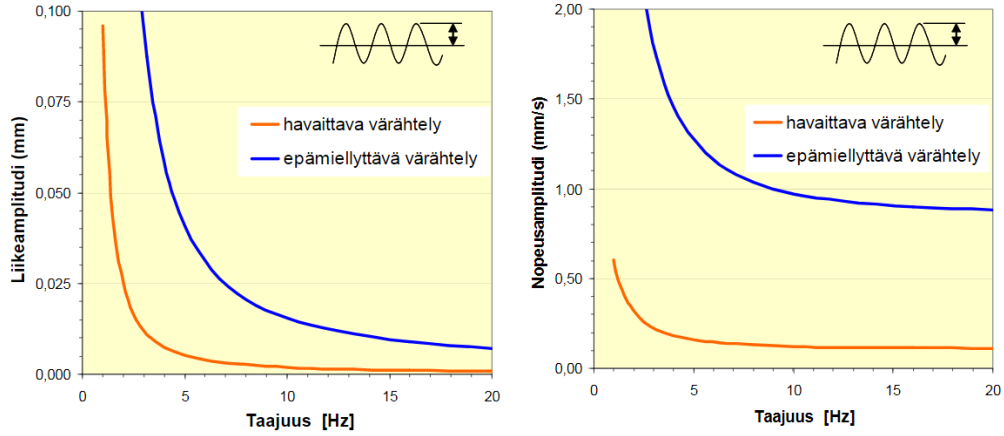
Taulukko 10: Standardin BS 7835 mukaiset kosmeettisten vauroitumisten ohjearvot ohimenevälle värähtelylle.[48]

Rakennustyyppi	Nopeusvärähtelyn huippuarvo (mm/s)	
	4-15 Hz	≥ 15 Hz
Vahvistetut rakenteet tai runkorakenteet Teollisuus- ja raskaat liikerakennukset	50	
Vahvistamattomat rakenteet tai kevyet runkorakenteet Asuin- tai kevyet liikerakennukset	15 taajuudella 4 Hz 20 taajuudella 15 Hz	20 taajuudella 15 Hz 50 taajuuksilla ≥ 40 Hz

2.8 Ihmisen kokema häiritsevyys

Ihminen pystyy havaitsemaan värähtelyä eri muodoissa riippuen taajuusalueesta joko ihmiskehon mekaanisena värähtelynä eli tärinänä, ja/tai eri rakenteiden säteilemänä runkomeluna joka havaitaan kuuloaistin välityksellä. Tärinää voidaan aistia ihmiskehon värähtelynä, jolloin merkityksellinen taajuusalue on 1-80 Hz, tai tuntoaistin kautta, jolloin taajuusalue saattaa olla suurempi. Runkomelun kannalta on 16-250 Hz:n taajuusalue olennaisin, mutta tietyissä tapauksissa saattaa merkityksellinen taajuusalue ulottua jopa 500 hertsiin asti. [13]

Tärinän vaikutukset voidaan jakaa kolmeen eri kriteeriin: terveydelle haitalliseen, epämukavuuden tunteeseen ja matkapahoinvointiin [51]. Raideliikenteen tärinän kannalta ei matkapahoinvoinnin tutkiminen ole relevanttia, kun tarkastelun kohteena ei ole vaunujen sisällä esiintyvä värähtely. Raideliikenteen aiheuttamat värähtelytasot rakennuksissa ovat suhteellisen pieniä eivätkä aiheuta pysyviä terveysvaikutuksia ihmisiin tai vaikuta jokapäiväisiin toimintoihin [50]. Yleisesti korkeammat tärinätasot aiheuttavat unihäiriöitä, keskittymisongelmia, puhehäiriöitä ja alennettua työkapasiteettia. Toisaalta, raideliikenteen tärinä voi aiheuttaa häiriötä asukkaille ja johtaa valituksiin [1]. Kuvassa 9 nähdään VTT:n mukaiset raja-arvot taajuuden funktiona liikepoikkeaman ja värähtelyn nopeuden havaitsemiselle ja epämiellyttävyydelle.



Kuva 9: Ihmisen herkkyyys harmoniselle värähtelylle. Kuva saatu viitteestä [10].

Runkomelun osalta vaikutukset ihmiseen ovat häiritsevyyden kannalta hyvin samankaltaiset kuin tärinän. Häiriövaikutuksia on havaittu syntyvän, kun runkomelutaso L_{ASmax} ylittää 35 dB [15]. Toisaalta, jos vallitseva taustamelutaso on pieni, runkomelu voi erottua siitä selvästi jo alle 35 dB:n rajan.

2.8.1 Värähtelyn tunnusluku

Ihmisen herkkyyys värähtelylle riippuu värähtelytapahtuman taajuussisällöstä, jonka takia tarkasteltava signaali jaetaan taajuuskomponentteihin. Jokainen värähtelykomponentti painotetaan vastaamaan ihmisen herkkyyttä, jonka jälkeen suurin tehollisarvo v_w voidaan määrittää. Käytetty taajuuspainotus perustuu standardissa ISO 2631-2 [20] määritettyyn värähtelyn taajuuspainotukseen W_m , jota on käytetty mm. muassa standardeissa NS 8176 ja DIN 4150-2 [10]. Painotettu tehollisarvo kuvaa yhden sekunnin pituista ajanjaksoa, jolloin mitatun värähtelytapahtuman painotettu tehollisarvo on suurin [10]. Värähtelyn nopeuden painotuskerroin taajuudella f on [10]

$$W_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}, \quad (45)$$

jossa f_0 on 5,6 Hz. Jos suurena käytetään värähtelykiihtyvyyttä voidaan painotuskerroin laskea käyttäen kaavaa [10]

$$W_a = \frac{35,7}{2\pi f} W_v, \quad (46)$$

missä f on taajuus ja W_v värähtelyn nopeuden painotuskerroin. Painotuksen jälkeen painotettu tehollisarvo v_w voidaan määrittää aikatasossa käyttäen [10][19]

$$v_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{t} \int_{t_0-\tau}^{t_0} v_w(t)^2 dt}, \quad (47)$$

jossa $v_w(t)$ on painotettu nopeussignaali, t_0 on tarkasteltava ajan hetki ja τ yksi sekunti. Jos painotettu tehollisarvo lasketaan värähtelykiihtyvyyden avulla korvataan kaavan 47 painotettu värähtelyn nopeus $v_w(t)$ painotetulla värähtelykiihtyvyydellä $a_w(t)$. Painotettu tehollisarvo voidaan myös määrittää taajuustasossa, jolloin tarkastelu tehdään terssikaistoittain

$$v_w = \sqrt{\sum_i (W_{v,i} v_i)^2}, \quad (48)$$

missä $(W_{v,i} v_i)^2$ on värähtelyn painotettu tehollisarvo terssikaistalla i [10]. Mikäli värähtelymittaukset ovat lähtökohta värähtelyluokitukseen, määritetään värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ käyttäen eri värähtelytapauksien suurimpia tehollisarvoja. Värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ voidaan määrittää käyttäen mitattujen tehollisarvojen v_w keskiarvoa $\overline{v_w}$ ja keskihajontaa σ lausekkeesta

$$v_{w,95} = \overline{v_w} + 1,8\sigma, \quad (49)$$

missä keskiarvo $\overline{v_w}$ lasketaan 15:sta suurimmasta värähtelytapauksesta. Tunnusluku on määritelty tilastollisesti siten, että satunnainen värähtelytapaus ei 95% todennäköisyydellä ylitä tunnuslukua. [31]

2.8.2 Standardit ja ohjearvot

Tässä osiossa käsitellään ihmisen häiritsevyyden kannalta oleellisia tärinään ja runkomeluun liittyviä ohjearvoja. Taulukossa 11 on VTT:n [10] koostama lista värähtelyn tehollisarvon v_w ohjearvoista eri kohteille eri maissa.

Värähtelyn ohjearvoja on annettu myös mm. seuraavissa standardeissa [55]: ANSI S3.29, BS 6472, VDI 2057 ja ÖNORM S 9012. Suomessa ympäristöministeriön ohjeessa rakennuksen ääniympäristölle [56] annetaan maaperäisen runkomelutason ohjearvoiksi L_{prm} 30 dB ja 35 dB. Tärinälle on määritetty ohjearvoksi $v_{w,95} \leq 0,30$ mm/s. Helsingin metron suunnittelussa käytettiin raja-arvoja L_{ASmax} 30 ja 35 dB [57]. VTT [15] on myös laatinut suosituksen runkomelutasojen raja-arvoista, joiden tarkoituksena on häiriövaikutusten minimointi. Taulukossa 12 on Länsimetron suunnittelussa käytettyjä runkomelun tavoitetasoja L_{ASmax} , jotka perustuvat kyseisiin VTT:n suosittelemiin raja-arvoihin.

Taulukko 11: Suosituksia painotetun värähtelyn tehollisarvolle v_w . [10]

v_w [mm/s]	Soveltamisalue, häiriölähde ja viite
$\leq 1,0$	Vanhat rata- ja asuinalueet, junat [50] (SWE)
$\leq 0,6$	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla, raide- ja tieliikenne [52] (NOR)
$\leq 0,6$	Uudet teollisuusalueet, raide- ja tieliikenne [53] (GER)
$\leq 0,6$	Maanpäällinen raideliikenne vanhoilla asuinalueilla [53] (GER)
$\leq 0,4$	Uudet asuinalueet ja peruskorjattavat väylät, junat [50] (SWE)
$\leq 0,36$	Uudet toimistalueet, junat [54] (USA)
$\leq 0,3$	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa, raide- ja tieliikenne [52] (NOR)
$\leq 0,3$	Uudet seka-alueet, raide- ja tieliikenne [53] (GER)
$\leq 0,3$	Maanalainen raideliikenne vanhoilla asuinalueilla [53] (GER)
$\leq 0,25$	Uudet asuinalueet, junat [54] (USA)
$\leq 0,2$	Uudet asuinalueet, raide- ja tieliikenne [53] (GER)
$\leq 0,15$	Suhteellisen hyvät olosuhteet, raide- ja tieliikenne [52] (NOR)
$\leq 0,15$	Erityisrakennukset, jotka on tarkoituksellisesti suunniteltu häiriöttömiksi, raide- ja tieliikenne [53] (GER)
$\leq 0,1$	Hyvät asuinolosuhteet, raide- ja tieliikenne [52] (NOR)

Taulukko 12: Länsimetron suunnittelussa käytetyt runkomelun tavoitetasot [58]

Tilatyyppe	L_{ASmax}
Asunnot	30 dB
Opetus- ja neuvottelutilat	35 dB
Toimistot	40 dB

3 Menetelmät

Tässä kappaleessa käydään läpi eri menetelmiä raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn arvioimiseen. Arviointimenetelmien lisäksi tutustutaan lyhyesti eri värähtelyn tekniisiin torjuntakeinoihin. Värähtelymittausten avulla pystytään objektiivisesti määrittämään rakenteissa esiintyvän värähtelyn suuruutta sekä muita värähtelyominaisuuksia. Mitatut signaalit on käsiteltävä sopivien signaalianalyysimenetelmien avulla, jotta vertailukelpoiset suureet pystytään määrittämään. Tilanteissa, esimerkiksi suunnittelutehtävissä, joissa rakenteiden värähtelymittauksia ei ole mahdollista tehdä, voidaan rakenteiden värähtelykäyttäytymistä mallintaa eri menetelmin. Mittaus- ja mallinnustulosten perusteella pystytään arvioimaan, jos esiintyvä värähtely on haitallista rakenteille tai ihmiselle. Mikäli värähtelyhaittoja todetaan esiintyvän, pyritään värähtelyä vähentämään teknisillä torjuntakeinoilla.

3.1 Mittaukset

Yhtenäiset käytännöt värähtelyn mittaamisessa ovat tärkeitä tulosten luotettavuuden ja vertailukelpoisuuden kannalta. Useimmiten värähtelymittausten tavoitteena on selvittää suurinta esiintyvää värähtelyä rakenteissa ja mittaustulosten perusteella arvioida rakenteisiin kohdistuvaa vaurioriskiä ja ihmisiin kohdistuvia häiriövaikutuksia. Yhteiset käytännöt niin kansallisella kuin kansainvälisellä tasolla luovat myös luotettavan pohjan alan kehittämislle ja tiedon hyödyntämiselle. [10]

3.1.1 Mittaussuureet

Kaikkia kolmea värähtelyn suuretta pystytään mittaamaan käyttäen nykyaikaisia värähtelyantureita. Suureen valinta on erityisesti tärkeää silloin, kun suoritettavat mittaukset ovat laajakaistaisia ja mitattavat signaalit sisältävät useita eri taajuuskomponentteja. Liikepoikkeaman mittaaminen painottaa etenkin matalia taajuuksia, kun taas kiihtyvyyden mittaaminen tuo esiin korkeammat taajuudet. Mekaanisten järjestelmien eli kuten betonirakenteiden luonne on sellainen, että huomattavia liikepoikkeaman arvoja esiintyy ainoastaan matalilla taajuuksilla. Nopeusvärähtelyn tehollisarvo antaa parhaan indikaation värähtelyn haitallisuudesta, sillä värähtelyn nopeus on verrannollinen mitatun signaalin sisältämään energiaan. Suositeltavaa on kuitenkin mitata suuretta, joka antaa tasaisimman spektrin. Tällöin saadaan käytettävän anturin dynamiikka-alue parhaiten käytettyä hyväksi. Tämän vuoksi värähtelyn mittaussuure on useimmiten kiihtyvyys- tai nopeusvärähtely. Mainittavaa on, että tämän työn mittauksissa mitattiin kiihtyvyysvärähtelyä käyttäen kiihtyvyyssantureita. Tämän vuoksi seuraavassa osiossa käsitellään kiihtyvyysantureita. [45]

3.1.2 Kiihtyvyysanturit

Tässä osiossa käsitellään lyhyesti värähtelyantureita, lähinnä kiihtyvyysantureita, sekä niiden kiinnitystapoja. Kolme anturityyppiä löytyy värähtelyn mittaamiseksi: kiihtyvyys-, nopeus- ja liikepoikkeama-anturit. Nimiinsä viitaten, kyseisillä antureilla mitataan kiihtyvyyttä, nopeutta ja liikepoikkeamaa. Värähtelymittauksissa

yleisesti käytettävien kiihtyvyyssantureiden toimintaperiaate perustuu pietsosähköiseen ilmiöön. Pietsosähköisten kiihtyvyyssantureiden taajuusalue on erittäin laaja, jonka lisäksi niiden lineaarisuus ja dynamiikka on hyvä koko taajuusalueella.

Kiihtyvyyssantureiden lähtösignaalin ollessa jännitettä on ne muunnettava kiihtyvyyssignaaleiksi. Tiedettäessä anturin herkkyys S (mV/g), voidaan muunnos suorittaa lausekkeella

$$a = \frac{V}{S}, \quad (50)$$

missä V (V) on mitattu jännitesignaali. Käytettävien antureiden herkkyysominaisuudet tulisi olla mitattavaan kohteeseen sopivat, jotta riittävän pientä tai suurta värähtelyä pystytään mittaamaan. Yleissääntönä on, että anturi ei saisi painaa enemmän kuin 1/10 mitattavan kohteen massasta, sillä anturin massa voi silloin vaikuttaa värähtelyn suuruuteen ja taajuuteen mittauspisteessä. Tyypillisesti kiihtyvyyssantureiden mekaaninen resonanssitaajuus on luokkaa 20-30 kHz. 3 dB:n mittaustarkkuuden saavuttamiseksi ylärajataajuuden on oltava 50 % resonanssitaajuudesta. Jotta noin 1 dB:n tarkkuus eli lähes tasainen taajuusvaste saavutetaan mittausten raja-
taajuutena, on käytettävä enintään 1/3 resonanssitaajuudesta. [45]

Alarajataajuus määrittyy pääasiallisesti kahdesta tekijästä, jotka ovat anturin esivahvistimen ylipäästösuojaus ja ympäröivän lämpötilan vaihtelu. Esivahvistimen päästösuojauden rajataajuus ei useimmissa tapauksissa muodostu ongelmaksi, sillä taajuus on tyypillisesti alle 1 hertsin. Lämpötilavaihtelutkaan eivät muodosta ongelmaa nykyaikaisissa antureissa etenkin normaaleissa käyttöympäristöissä. Anturit voidaan kiinnittää mitattavaan kohteeseen esimerkiksi liiman, magneetin tai ruuvien avulla. Kiinnitystapa vaikuttaa lähinnä käytettävään ylärajataajuuteen. Jäykemmällä kiinnitystavalla saavutetaan korkeampi rajataajuus. [45]

3.1.3 Standardit ja ohjeet

Lukuisia standardeja sekä ohjeita löytyy värähtelymittausten suorittamiseen tulosten vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi. Olennaista on menetelmien vakiointi ja toistettavuus, jotta eri tahot pystyvät mittaamaan värähtelyä samalla tavalla. Tärkeätä on myös mittaustulosten vertailu ohje- tai raja-arvoihin, jotta mahdolliset ylitykset voidaan todeta.

Värähtelymittauksiin ja tulosten analysointiin liittyviä standardeja ovat mm.: ISO 4866, ISO 7626, ISO 10815, ISO 14837 ja ISO 18431. Standardeissa NS 8176 ja ISO 2631-2 kuvaillaan mittauslaitteistolle ja signaalinkäsittelylle asetetut vaatimukset. Vaatimuksia ovat mm.: mittauslaitteiston kalibrointi, mittauslaitteiston herkkyys sähkömagneettisille ilmiöille, mittauslaitteiston tarkkuus käytetyllä taajuusalueella, antureiden ja vahvistimien lineaarisuus 1-80 Hz:n taajuusalueella, antureiden tarkkuus käytetyllä taajuusalueella, signaalien esisuojaus ja suodattimien ominaisuudet [10][20][52].

VTT:n tiedotteessa 2278 [10] suositellaan mittaustapaa, jossa tavoitteena on selvittää asukkaan suurinta kokemaa värähtelyä. Tällöin mitataan lattian värähtelyä lattian keskipisteestä, jolla kantavan rakenteen jänneväli on suurin tai asukas kokee

värähtelyn voimakkaimpina. Jos rakennuksessa on monta erilaista lattiarakennetta, suositellaan mittaamista useammasta lattiasta. Perustusten värähtelymittauksia käytetään usein rakennuksen vaurioitumisen arvioimiseksi. Tällöin mittauspisteet voidaan valita rakennuksen sisäpuolelta kantavan rakenteen kohdalta, jossa rakennus liittyy perustuksiin. [10]

3.1.4 Värähtelymittaukset

Mittaukset voidaan tehdä kolmessa pääsuunnassa: pystysuunnassa (z-suunta) ja kahdessa vaakasuunnassa (x- ja y-suunta) [10]. Joissain tilanteissa vääntövärähtelyn mittaaminen voi myös olla tarpeen. Esimerkiksi korkeiden rakennusten rungoissa voi esiintyä vääntövärähtelyä, kun rakennuksen eri tasot kääntyvät sen pysty akselin ympärille. [31]

Värähtelyä esiintyy kaikissa suunnissa, mutta pystysuuntainen värähtely on lähes aina merkittävin ja mielenkiintoisin suunta etenkin välipohjien tarkastellussa. Kappaleessa 2.4.3 todettiin välipohjan yleisimpien tuentatapojen vastustavan pysty- ja vaakasuuntaisia voimia, jolloin liikepoikkeama on hyvin vähäistä välipohjan reunoilla. Välipohjan ollessa erittäin jäykkä pituus- ja leveyssuunnassa verrattuna pystysuuntaan, vastustaa se myös liikepoikkeamaa enemmän vaakasuunnassa. Vaakasuuntainen suuri jäykkyys kytkee myös värähtelyä hyvin tehokkaasti kyseisessä suunnassa, jolloin voidaan olettaa vaakasuuntaisten värähtelyamplitudien olevan likimain yhtä suuria kuin rakennusrungon samansuuntaisten amplitudien. Pystysuuntaisen värähtelyn kytkeytyessä hyvin rakennuksissa, ovat myös värähtelyamplitudit suurempia kuin vaakasuunnassa. Tällöin mittauspisteeksi valitaan välipohjan keskipiste tai huonetilan nurkkapiste kantavan rakenteen vierestä. Välipohjan mittaus jäykästä kohdasta edustaa tällöin rakennusrungon värähtelyä.

3.1.5 Mobiliteettimittaukset

Erään moodianalyysimenetelmän perusteena on mitata taajuusvastefunktioita (FRF, Frequency response function). Liikettä voidaan kuvailla liikepoikkeamana, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Näiden suureiden taajuusvasteet ovat komplianssi, mobiliteetti ja akseleranssi. Yleisesti mobiliteettimittauksista puhuttaessa käytettävä termi kattaa kaikki taajuusvastefunktiot. Mobiliteetti saadaan laskemalla herätteen ja rakenteen taajuusvasteiden $X(\omega)$ ja $F(\omega)$ välinen suhde [25]:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)}. \quad (51)$$

Dynaamisen molemminpuolisuusperiaatteen mukaan siirtomobileettiparit ovat yhdenmukaisia lineaarisesti elastisille rakenteille. Annetaan $Y_{ij}(f)$ olla mitatun nopeusvasteen kompleksinen suhde pisteessä i impulssin tuottamalle voimalle pisteessä j taajuudella f . Periaatteen mukaan tulisi $Y_{ij}(f) = Y_{ji}(f)$, missä mittaus $Y_{ji}(f)$ on nopeusvasteen suhde pisteessä j impulssin voimalle pisteessä i . Mittausparin välinen yhteenpitävyys annetussa lineaarisessa rakenteessa vahvistavat asianmukaiset mittalaitteet ja käytetyt menettelytavat. Vertaamalla taajuusvaste- ja koherenssifunktiotuloksia voidaan mitatun impulssin ja värähtelyvasteen välinen lineaarisuus

empiirisiä menetelmiä. Tässä työssä rakenteiden ominaistajuuksien ollessa keskeisessä osassa käytetyn mallinnusohjelmiston moodianalyysityökalun periaate käydään lyhyesti läpi. Rakenteiden värähtelyä pystytään mallintamaan ja ennustamaan eri menetelmien avulla. Mallinnusta käytetään erityisesti suunnitteluvaiheessa ennustamaan tulevia värähtely- ja runkomelutasoja. Tavoitteena mallinnuksessa on usein arvioida värähtelytorjunnan tarve ja varmistaa etteivät tulevat värähtelytasot aiheuta rakennevaurioita tai häiritse ihmisiä.

3.3.1 Mallinnusmenetelmät

Tässä osiossa tarkastellaan yleisellä tasolla eri mallinnusmenetelmiä. Standardin ISO 14387-1 mukaan mallinnusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: parametriset, empiiriset sekä puoliempiiriset mallit. [13]

Parametriset mallinnusmenetelmät voidaan jakaa algebrallisiin ja numeerisiin ratkaisuihin. Nykyaikaiset mallinnus työkalut pystyvät laskemaan ja ratkomaan monimuotoisia värähtelyjä ja niiden siirtymiä realististen ehtojen alla. Yleisimmät käytettävät menetelmät värähtelyn sekä sen etenemisen tarkasteluun ovat FDM (Finite Difference Method), FEM (Finite Element Method) ja BEM (Boundary Element Method) sekä lukuiset variaatiot näistä menetelmistä. Numeerisia mallinnusratkaisuja voidaan käyttää, kun riittävä määrä tietoa on saatavilla värähtelyjärjestelmästä. Jos tarkastelun kohteena ovat rajalliset tasot (finite domains) käytetään FEM- ja FDM-menetelmiä, kun taas rajattomien (unbounded domains) tasojen kohdalla käytetään BEM-menetelmää. BEM-mallit tuottavat pienemmän matriisin verrattuna FEM-malleihin, mikä johtaa lyhempään laskenta-aikaan. Analyysi voidaan suorittaa niin yhdessä, kahdessa kuin kolmessa dimensiossa. [1] [13]

Empiiriset mallit perustuvat taas havaintoihin ja mittauksiin, joita hyödyntämällä voidaan arvioida värähtelyä. Tämän kaltaiset mallit ovat yleisesti helppokäyttöisiä ja yksinkertaisia, mikä on myös niiden haittapuoli. Käytettävät arvot eivät useimmiten ole tarkkoja mikä myös johtaa suuntaa antaviin tuloksiin. Näitä malleja voidaan toisaalta käyttää alustavassa suunnittelussa niiden helppokäyttöisyyden ansiosta. Empiiriset mallit voidaan jakaa niin yhden kuin usean kohteen malleihin. [1][13]

Puoliempiiriset mallit ovat yhdistelmiä parametrisista ja empiirisistä malleista. Tämän tyyppisissä malleissa yksi tai useampi empiirinen komponentti tai parametri korvataan analyttisellä vastineella tai tarkistusmittausten tuloksilla lähes valmiista kohteesta. [13]

3.3.2 Värähtelyn empiiriset mallit

Perustuksen, rakennusrungon ja välipohjan värähtelyä voidaan arvioida käyttäen erilaisia empiirisiä malleja, jotka pitkälti perustuvat osiossa 2.4.4 esitettyyn teoriaan. Perustuksen vaaka- ja pystysuuntaista värähtelyä voidaan arvioida kertomalla mitattu maa- tai kallioperän taajuussisältö $\bar{v}_{w,i}^{maa}$ jokaisella taajuuskaistalla kertomella

$$k_i^{\text{per}} = -\frac{A}{\log 8} \log \frac{f_i}{80}, \quad (52)$$

missä f_i on tarkasteltavan terssikaistan keskitaajuus ja A on yksi [31]. Perustusten värähtelyn tunnusluvut suunnille x, y ja z voidaan sitten laskea maa- tai kallioperän mittaustuloksista määritetyn tunnusluvun avulla [31]

$$v_{w,95}^{\text{per}} = v_{w,95}^{\text{maa}} \bar{v}_{w,95}^{\text{per}}, \quad (53)$$

missä

$$\bar{v}_{w,95}^{\text{per}} = \sqrt{\sum_i (k_i^{\text{per}} \bar{v}_{w,i}^{\text{maa}})^2}. \quad (54)$$

Rakennusrungon värähtelyä voidaan arvioida perustusten tunnusluvuista lausekkeella [31]

$$v_{w1}^{\text{runko}} = k_1^{\text{runko}} \max(v_{w,95}^{\text{per}, x}, v_{w,95}^{\text{per}, y}, v_{w,95}^{\text{per}, z}), \quad (55)$$

missä kerroin k_1^{runko} on 1,5 yksi- ja monikerroksisille rakennuksille, jotka ovat perustettu paaluille, ja $k_1^{\text{runko}} = 1$ yksikerroksisille rakennuksille, kun niiden perustusta pa ei ole paalutettu. Monikerroksisissa rakennuksissa tulisi myös tehdä resonanssitarkastelu rakennusrungon vaakasuuntaiselle värähtelylle. Välipohjien tapauksessa vaakavärähtely voidaan arvioida perustuksen pystyvärähtelyn tunnusluvun avulla käyttäen lauseketta [31]

$$v_{w1}^{\text{lattia}} = k_1^{\text{lattia}} v_{w,95}^{\text{per}, z}, \quad (56)$$

missä kerroin k_1^{lattia} on 1,5. Välipohjalle tulisi myös tehdä resonanssitarkastelu, jossa pystysuuntainen värähtely perustuu perustuksen suurimpaan pystysuuntaiseen terssikaistan värähtelykomponenttiin $v_{w,j}^{\text{per}}$, jolle välipohjan ominaistajuus sattuu. Tällöin välipohjan pystysuuntainen värähtely lasketaan lausekkeesta [31]

$$v_{w2}^{\text{lattia}} = k_2^{\text{lattia}} v_{w,j}^{\text{per}}, \quad (57)$$

missä kerroin $k_2^{\text{lattia}} = 6,0$ ja $v_{w,j}^{\text{per}}$ on perustusten pystysuuntaisen terssikaistan värähtelykomponentti. Maanalaisten tilojen tapauksessa huoneessa sijaitsevan välipohjan kiihtyvyydestä keskellä huonetta voidaan arvioida lausekkeella [33]

$$L_{a,\text{huone}} = L_{a,\text{tunneli}} - C_g - C_{gb} - C_b, \quad (58)$$

missä L_a on metrotunnelin seinän oktaavikaistainen kiihtyvyydestä metron ohittaessa, C_g on etenevän värähtelyn vaimennus maaperässä, C_{gb} on maa- tai kallioperän ja rakennuksen välinen kytkentähäviö, ja C_b on värähtelyvaimennus rakennuksessa. Välipohjan nopeustaso voidaan arvioida olettaen, että metrotunnelin ja tutkittavan huoneen välillä esiintyy siirtohäviöitä. Nopeustaso L_B , voidaan tällöin estimoida lausekkeella [60]

$$L_B = L_r + R_{tr} + R_{tu} + R_g + R_b, \quad (59)$$

missä L_r on raiteen nopeustaso, R_{tr} on raiteen siirtohäviö, R_{tu} on tunnelin siirtohäviö, R_g on maa- tai kallioperän siirtohäviö ja R_b on rakennuksen siirtohäviö.

3.3.3 Runkomelun empiiriset mallit

Huoneen runkomelutason arvioimiseksi löytyy monia empiirisiä ennustusmalleja, joista muutama esitellään tässä osiossa. Runkomelutaso $L_{p,huone}$ huoneessa voidaan arvioida käyttäen empiiristä suhdetta [33]

$$L_{p,huone} = L_{a,huone} - 20\log(f) + 37, \quad (60)$$

jossa $L_{a,huone}$ on kiihtyvyydestä keskellä lattiaa ja f tarkasteltavan oktaavikaistan keskitaajuus. Runkomelutaso L_p voidaan myös arvioida käyttäen lauseketta [60]

$$L_p = L_v + 10\log(\sigma) + 10\log\left(\frac{4S}{A}\right), \quad (61)$$

missä L_v on välipohjan värähtelyn nopeustaso, σ on säteilytehokkuus, S on värähtelevän pinnan pinta-ala ja A on tilan absorptiopinta-ala. Peltonen ja Backholm [61] taas antavat kaavan:

$$L_{pA}(r) = L_{vA}(r_0) - R\log(r/r_0) - k(r - r_0) - K_A - K_C + K_{p-v}, \quad (62)$$

missä

$L_{pA}(r)$ on kohteen arvioitu runkomelutaso (dB)

$L_{vA}(r)$ on A-painotettu värähtelytaso referenssietäisyydellä r_0

r on kohteen ja radan lähin alla olevan kalliopinnan välinen etäisyys

k on kallioperän etäisyysvaimennus

K_A on ratarakenteen ja rataa sijoitettusta eristyksestä riippuva tekijä

K_C on kallion ja rakennuksen väliseen kytkeytymiseen liittyvä tekijä

K_{p-v} on rakenteiden värähtelyn ja muodostuvan ilmaäärän välinen muunnoskerroin.

Kaava 62 on matemaattinen ja siinä käytetyt kertoimet määritellään mittausten perusteella. Peltonen ja Backholm [61] toteavat myös, että runkomelun A-painotettu äänitaso on yleensä noin 10 dB korkeampi kuin rakenteen mitattu A-painotettu värähtelyn nopeustaso, kun nopeustason referenssinä käytetään $v_0 = 50$ nm/s.

3.3.4 Moodianalyysi

Osiassa 2.4.3 tutustuttiin välipohjien ominaistajuuksien teoreettisiin laskentakaa-voihin. Rakenteen ominaistajuudet voidaan myös ratkaista parametrinen mallin-
nuksen avulla. Tässä työssä käytetty Autodesk Robot-ohjelmisto ratkaisee mallin-
netun rakenteen ominaistajuudet lausekkeesta

$$(K - \omega_i^2 M)U_i = 0, \quad (63)$$

missä K on rakenteen jäykkyysmatriisi, M on rakenteen massamatriisi, ω_i on moodin i ominaistajuus ja U_i on moodin i ominaismoodivektori. [62]

3.4 Haittojen arviointi

Yllä mainittujen menetelmien avulla pystytään arvioimaan mahdollisia värähtelyn sekä runkomelun aiheuttamia haittoja. Tärinää voidaan arvioida kolmella eri tasolla maankäytön suunnittelussa VTT:n julkaisun [30] mukaisesti. Arviointitaso 1 perustuu turvaetäisyyteen, joka ottaa huomioon raskaan maantie- ja katuliikenteen, raideliikenteen ja maaperän pehmeiden. Ensimmäisen tason tarkastelulla selviää, jos värähtelytarkastelu pitää suorittaa. Jos rakennusalue sijaitsee ensimmäisen arviointitason perusteella riskialueella, käytetään arviointitasoa 2. Arviointitaso 2 perustuu maaperän värähtelyn laskennalliseen arvioon tai joissakin tilanteissa tarkistusluonteisiin värähtelymittauksiin. Pääperiaatteena on selvittää maan pinnan pystyvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$. [30]

Jos toisen arviointitason laskennallinen tarkastelu ei tuota riittävän luotettavaa kuvaa pystyvärähtelystä on syytä käyttää arviointitasoa 3. Kolmas arviointitaso perustuu rakennuspaikalla tehtäviin värähtelymittauksiin. Tarkin ja luotettavin tapa värähtelyhaittojen arvioimiselle on mittausten teettäminen. [30]

Kolmitasoisien arviointimenetelmän keskittyessä pääsääntöisesti maaperän ja maanpäälliselle värähtelylle ei sitä käsitellä tarkemmin tämän työn rajoituksista johtuen. Tässä työssä käytetyt arviointimenetelmät perustuvat värähtelymittauksiin ja niiden tuloksiin. Mittaustuloksia verrataan annettuihin ohjearvoihin, joiden perusteella voidaan päätellä ja arvioida, jos metron aiheuttama värähtely on mitatuille ja mahdollisesti muille rakenteille haitallista. Mittaustulosten avulla voidaan myös suorittaa resonanssitarkastelua, josta voidaan arvioida, mikäli metron ohiajoista syntyvä heräte kykenee herättämään haitallisimpia matalia ominaistajuuksia, joissa myös liikepoikkeama on suurinta.

Runkomelua voidaan arvioida kolmella eri tasolla [15]: suojaetäisyyteen perustuva alustava arviointi, runkomelun leviämisen laskennallinen arviointi sekä mittauksiin perustuva arviointi.

3.5 Värähtelyn tekniset torjuntakeinot

Tässä osiossa käsitellään joitakin yleisiä menetelmiä maanalaisen raideliikenteen värähtelyn vähentämiseksi. Raideliikenteessä yleisimmät keinot keskittyvät pyörien ja

kiskojen kunnossapitotoimenpiteisiin. Mikäli värähtelyhaittojen arvioinnissa ilmenee mahdollisia haittavaikutuksia, on syytä suunnitella torjuntakeinoja värähtelyn vaimentamiselle. Värähtelyn torjunnalla pyritään vaimentamaan värähtelyherätettä tai sen leviämistä rakenteisiin. Värähtelyn vaimentaminen voi myös johtaa matalampiin runkomelutasoihin. Koska raideliikenteen värähtely ei useimmissa tapauksissa aiheuta rakennevaurioriskejä, pyritään torjuntakeinoilla vähentämään ihmisen kokemaa tärinää ja etenkin runkomelua asuinrakennuksissa. Ihmisen kokemaa värähtelyn muutos ei ole lineaarisesti verrannollinen muutokseen värähtelyn suuruudessa. Tämän vuoksi muutoksen on oltava suhteellisen suuri, ennen kuin ihminen aistii pienentyneen tärinän. Yleisesti vasta värähtelyn puolittaminen johtaa merkittävään parannukseen ihmisen kokeman tärinähaitan kannalta. [31]

3.5.1 Kiskonhionta ja pyörien sorvaus

Kiskojen ja pyörien epätasaisuudet sekä kiskon korrugaatio vaikuttavat oleellisesti värähtelyherätteeseen, jolloin torjuntatoimenpiteitä voidaan tehdä näiden epätasaisuuksien pienentämiseksi. Toimenpiteet ovat tällöin kiskojen hionta ja junien pyörien sorvaus, jotka ovat säännöllisesti tehtäviä toimenpiteitä. Korrugaatio on suhteellisen jaksollista aaltoisuutta, joka esiintyy kiskon kulkupinnassa ja joka voidaan jakaa aaltopituuden mukaan lyhyeen ja pitkään korrugaatioon. [63]

Kiskonhiontaa tehdään ensisijaisesti pidentämään kiskojen käyttöikää ja hallitsemaan niiden kulumista. Kiskonhionnan tavoitteena ovat korrugaation ja vierintä-
väsymisvaurioiden poistaminen, sopivan kiskoprofiilin luominen ja uusien kiskojen asennukseen ja valmistukseen liittyvien haittojen poistaminen [63]. Ylläpito-
hionnan lisäksi voidaan suorittaa akustista hiontaa, jonka tarkoituksena on poistaa kiskon melupäästön kannalta oleellista epätasaisuutta [64].

Pyörien sorvauksen avulla pyörien kuluma voidaan poistaa. Junissa käytetyt jarrutyypit vaikuttavat oleellisesti pyörien kulumiseen. Valurautaisilla jarrupaluilla varustetut anturajarrut kuluttavat pyörän kulutuspintaa merkittävästi ja epätasaisesti. Kulutusta voidaan vähentää anturajarruissa korvaamalla valurautapalat komposiittimateriaalisiin jarrupaloihin. Pyörien kulutusta voidaan edelleen vähentää käyttämällä levyjarruja. [64]

Huonokuntoisille kiskoille ja pyörille tehty hionta ja sorvaus voi tuoda 10-20 dB:n parannuksen A-äänipainotetulle kontaktimelulle [65]. Tästä voidaan myös päätellä, että värähtelytasot luultavasti alenevat. Selkeästi korrugoitujen kiskojen hionnalla on saavutettu 10-15 dB:n parannus taajuusalueella 50-100 Hz sekä värähtelylle etä kontaktimelulle [66]. Lakušić ja Ahac [44] toteaa pyörien sorvauksen tuovan 5-10 dB:ä värähtelyvaimennusta. Kiskojen säännöllisellä hionnalla vaimennusta saavutettiin 10-20 dB ja kiskojen epäjatkuvuuskohtien poistamisella 0-5 dB [44].

3.5.2 Kiskojen vaimennus

Kiskojen vaimennus toteutetaan kiskoihin sijoitettavien elementtien avulla, jotka useimmiten asennetaan kiskojen molemmille sivuille ja jossain tapauksissa myös niiden alle. Erilliset kiskovaimentimet sijoitetaan kiskoon tasaisin välein, usein jokaisen ratapölkyn väliin. Kiskojen vaimennus voidaan myös toteuttaa käyttäen jatkuvia

kiskovaimentimia, jotka asetetaan kiskon koko pituudelle, mutta tätä kokoonpanoa käytetään harvemmin. Kuvassa 10 näytetään kiskoon asennettuja vaimentimia. [43]



Kuva 10: Esimekki kiskovaimentimesta. Kuva saatu viitteestä [43]

Vaimennusperiaatteen tavoitteena on vähentää kiskon värähtelyä kytkemällä se massaan vaimennetun jousen avulla. Vaimentimen massana toimivat teräselementit ja jousena kiskon ja teräselementtien välinen kumi. Vaimentimen vaikutus raiteeseen vastaa raiteen vaimennuskertoimen lisäämistä. [43]. Ongelmaksi kiskovaimentimissa on muodostunut niiden tehokkuuden todentaminen. Eri kokeilujen tulokset ovat olleet hyvinkin vaihtelevia; yleisesti vaimennustehokkuuden vaihteluväli on ollut 0-3 dB ja joissain harvoissa tapauksissa huippuarvo on ollut 7 dB [43]. Toisaalta Lakušić ja Ahacin [44] mukaan 7-9 dB värähtelyvaimennus on saavutettu.

3.5.3 Vaimennusmatot

Yleinen ja tehokas menetelmä, etenkin maanalaisten raiteissa on käyttää ratarakenteisiin sijoitettavia vaimennusmattoja, joilla voidaan vaimentaa ratarakenteista leviävää värähtelyä. Kuvassa 11 nähdään esimerkkejä ratarakenteisiin sijoitettavista vaimennusmatoista.



(a) Kiskonaluslevy.

(b) Pölkynaluslevy.

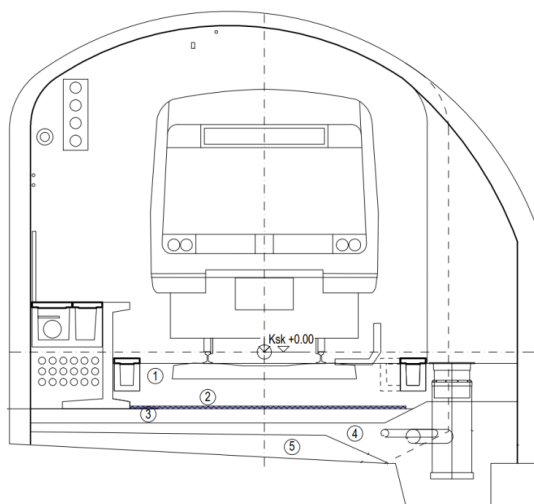
(c) Sepelinalusmatto.

Kuva 11: Esimerkkejä ratarakenteisiin sijoitettavista vaimennusratkaisuista. Kuvat saatu viitteestä: [67].

Kiskonaluslevy Kiskonaluslevyt, jotka ovat useimmissa tapauksissa valmistettu kumista, sijoitetaan kiskon ja betonisten ratapölkkyjen väliin. Mattojen pääasiallinen tarkoitus on vähentää ratapölkkyjen väsymyshalkeilua, mutta ne voivat myös vaimentaa värähtelyä [68]. Kiskonaluslevyistä puhuttaessa on myös syytä mainita joustavat kiskokiinnitykset, joiden avulla voidaan saada vaimennusta yli 30 Hz:n taajuuksilla. Noin 50 Hz:llä on saavutettu 6-10 dB:n vaimennusta 10-20 tonnin junien akselipainoilla [55]. Lakušić ja Ahac [44] taas ilmoittavat 5-10 dB:n vaimennuksen värähtelylle. Rajoittaviksi tekijöiksi joustavilla kiskokiinnityksillä on todettu niiden väsymykestävyys, geometrinen raiteiden leviäminen sekä niiden vinoutuminen kiskojen halkeilun yhteydessä. [55]

Pölkynaluslevy Ratapölkkyjen alle sijoitettavat vaimentavat aluslevyt ovat myös tehokas tapa vaimentaa junan aiheuttamaa värähtelyherätettä. Pölkynaluslevyille on saavutettu 15 dB:n lisäyshäviö 125 Hz:llä [55][68]. Lakušić ja Ahac [44] taas ilmoittavat 8-15 dB:n vaimennuksen.

Sepelinalusmatto Tukikerroksen eli raidesepelin tai raidesoran alle sijoitettavat elastiset alusmatot ovat yksi tehokkaimmista tavoista vähentää värähtelyn siirtymistä perustuksiin. Kyseisellä vaimennuskeinolla voidaan päästä jopa 20 dB:n vaimennukseen [68]. Lakušić ja Ahacin [44] mittauksiksi ilmoitetaan 10-15 dB:n värähtelyvaimennus. Kyseinen torjuntakeino on käytössä Länsimetrossa ja suunniteltu myös Länsimetron jatkeeseen. Kuvassa 12 nähdään Länsimetron ratatunnelin poikkileikkaus ja eristysmaton sijoituskohta. Nykyisellä Länsimetron osuudella käytetty vaimennus on 10, 13 ja 16 dB [69].



Kuva 12: Länsimetron ratatunnelin tyyppipoikkileikkaus. Sepelinalusmatto merkitty kuvaan sinisellä. Kuva saatu viitteestä [70].

3.5.4 Kellutetut raidejärjestelmät

Tehokkain mutta myös kallein tapa vähentää värähtelyä ratatunnelissa on kelluttaa koko ratarakenne sijoittamalla vaimentava rakenne tukevan betonilaatan alapuolelle [55]. Vaimennusrakenne toimii massa-jousijärjestelmänä, jonka tarkoituksena on vähentää värähtelyn leviämistä kantaviin perustuksiin ja ympäröiviin alueisiin. [68]

Periaatteena on käyttää ominaistaajuudeltaan hyvin matalataajuuksia, lineaarista harmonista värähtelijää. Usein värähtelijänä toimii raskas betonilaatta, joka on eristetty tunnelin pohjasta elastisilla kumilaakereilla tai metallijousilla. Kelluvan laatan ominaistaajuus tulisi olla mahdollisimman matala vaimentaakseen hyvin värähtelyä. Rantatalon [68] mukaan metrolinjoihin on asennettu massa-jousijärjestelmiä, joiden ominaistaajuus on 5-6 Hz. Tällöin on saavutettu 10 dB:n lisäyshäviö yli 16 Hz:n taajuuksien ja jopa 25 dB:n häviö 125 Hz:llä. [68]

3.5.5 Torjuntatapojen tehokkuuden arviointi

Yleinen tapa värähtelytorjunnan tehokkuuden määrittämiseksi on verrata vaimennettavan rakenteen tehot torjuntakeinolla ja ilman torjuntakeinoja. Tehojen välinen suhde voidaan ilmoittaa lisäysvaimennuksena ja laskea käyttäen kaavaa [4]

$$\Delta L = 10 \log \frac{P}{P'}, \quad (64)$$

missä P on rakenteeseen siirtyvä teho ilman torjuntakeinoja ja P' rakenteeseen siirtyvä teho värähtelytorjunnalla. Mitä korkeampi lisäysvaimennus on sitä parempi on vaimennus.

4 Mittaukset

Tässä kappaleessa esitellään työssä tehtyt mittaukset, mittausjärjestelyt ja niiden tulokset. Työn mittaukset suoritettiin 25.10.2018 Lauttasaaren metroaseman länsipäädyn teknisessä tilassa, joka sijaitsee laituritasolla. Mittausten tarkoituksena oli ensisijaisesti selvittää metron ohiajojen aiheuttamia värähtelyamplitudeja välipohjarakenteessa sekä välipohjan ominaistajuudet.

4.1 Mittausjärjestelyt

Tässä osiossa esitellään mittauksissa käytettyä tilaa, laitteistoa, mittauspisteitä ja muita huomioitavia seikkoja mittauksen toteuttamiseksi.

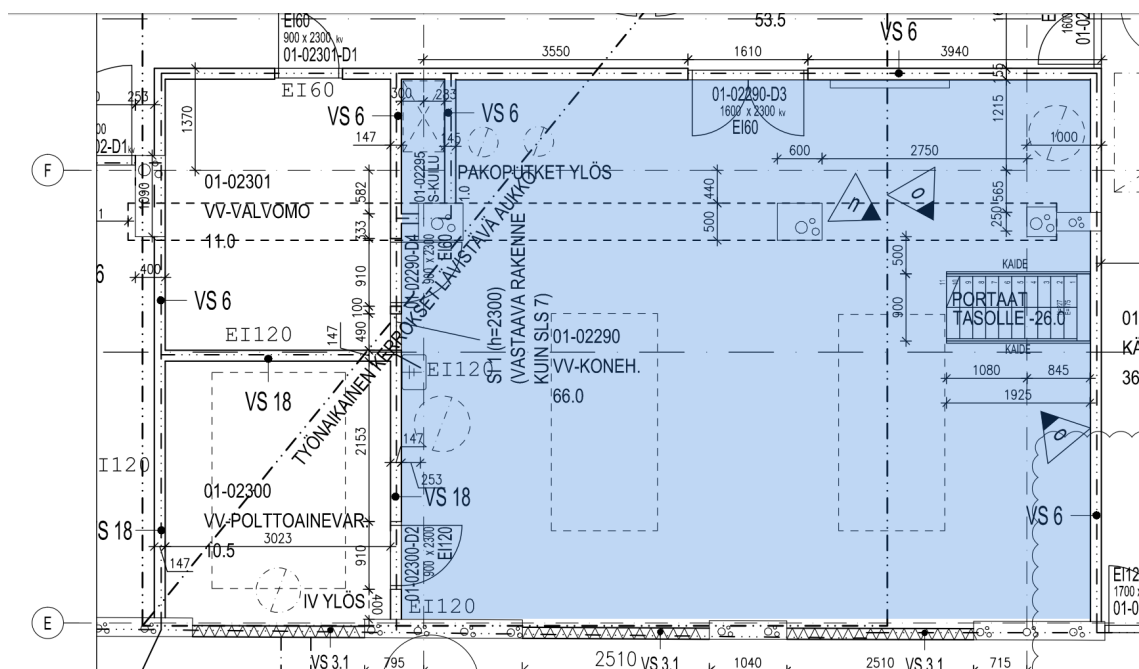
4.1.1 Mittaustila

Mittaustilaksi valikoitui rakennesuunnittelijan suositusten myötä Lauttasaaren metroasemalla sijaitseva varavoimalaitetila. Ensisijainen kriteeri tilan valitsemisessa oli riittävän suuren ja paljaan välipohjalaatan löytäminen. Lisäksi tärkeitä oli rakenteiden edustavuus ja yksinkertaisuus sekä tilan soveltuvuus mallinnukseen. Kuvassa 13 nähdään mittaustila ja mittausjärjestelyt. Kuvassa vasemmalla puolella sijaitsevan väliseinärakenteen toisella puolella sijaitsee itään päin liikennöivä metrotunneli.



Kuva 13: Mittaustila ja mittausjärjestelyt. Diplomityön ohjaajan Timo Peltosen takana varavoimakone.

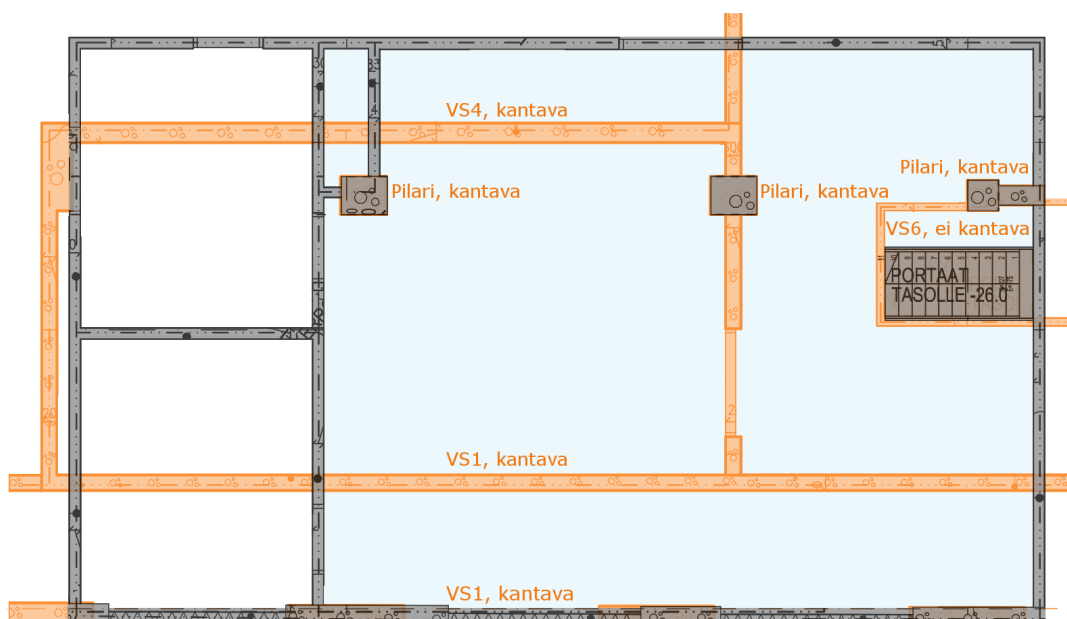
Tilan ja metrotunnelin välisestä pienestä etäisyydestä johtuen oletusarvona oli, että itään päin kulkevien metrojen ohiajot olisivat amplitudiltaan suurempia kuin länteen päin menevien. Tilan ilmoitettu pinta-ala pohjapiirustuksissa on 66 m^2 . Tilan leveydeksi L_x mitattiin 9,25 metriä ja pituudeksi L_y 7,25 metriä. Tilan korkeus on noin 4 metriä. Tilan tilavuus kyseisillä mitoilla on noin 270 m^3 . Kuvassa 14 nähdään pohjapiirustus tilasta.



Kuva 14: Pohjapiirustus mittaustilasta. Vaaleansininen alue edustaa mittaustilaa.

Tilassa sijaitsee varavoimakone, jonka painoksi ilmoitettiin 4820 kg. Ottaen huomioon koneen alla olevan lavetin voidaan koneen kokonaispainon arvioida olevan noin 5000 kg. Koneen alle jäävä lattiapinta-ala on noin 6,1 m². Lisäksi kuvasta 13 nähdään, että tilassa sijaitsee myös betonipilareita ja porrasaukko. Mainittavaa on myös, että mittauksien läheisyydessä sijaitsee vinohissi, joka liikkuessaan tuottaa värähtelyä ja runkomelua tilaan. Tilan välipohja on saatujen rakennetyyppitietojen mukaan paikalleen valettu 300 mm betonilaatta. Tilaa rajaavat väliseinärakenteet ovat sekä kantavia että ei-kantavia. Metrotunnelin ja mittauksien erottava seinärakenne koostuu osittain kantavista 250 mm betoniväliseinistä ja elementtiväliseinistä, joka ilmenee pohjapiirustuksesta 14. Tilan muut seinärakenteet ovat metallirankaisia väliseiniä. Pilarilinjan muodostavat kolme kantavaa pilaria ovat kooltaan 500x600 mm ja 450x450 mm.

Myös mittaustilan alla olevilla tiloilla ja rakenteilla on suuri vaikutus mittaustilan välipohjan tuentaan. Kuvassa 15 näkyy laituritason mittaustilan ja alla olevan kellaritason tilojen pohjapiirustukset päällekkäin. Harmaat alueet edustavat laituritason pystysuuntaisia rakenteita ja oranssit taas kellaritason rakenteita. Vaaleansininen alue edustaa käytettyä mittaustilaa. Kuvaan on myös merkitty kellaritason väliseinärakennetyypit ja kantavuustyyppit. Etenkin kantavat rakenteet ovat mittausten ja mallinnuksen kannalta tärkeitä ja ne on otettava huomioon, sillä ne vaikuttavat suoraan yllä olevan välipohjan tuentaan ja muodostuviin laatta-alueisiin ja täten myös ominaistajuuksiin.



Kuva 15: Pohjapiirustus laituritason mittaustilasta ja alla olevan kellaritason tiiloista. Harmaat alueet edustavat laituritason pystysuuntaisia rakenteita ja oranssit kellaritason pystysuuntaisia rakenteita. Vaaleansininen alue taas edustaa käytettyä mittaustilaa. Kuvaan on myös merkitty kellaritason kantavat väliseinärakenteet.

4.1.2 Mittalaitteisto

Värähtelymittauksissa käytettiin 21 kiihtyvyysanturia välipohjan värähtelyn mittaamiseksi eri puolella mittaustilaa sekä yhtä mikrofonia runkomelun mittaamiseksi. Taulukossa 13 nähdään mittauksissa käytettyjä laitteita. Käytettyjen kiihtyvyysantureiden ominaisuudet mm. herkkyys ja dynaaminen alue ovat tehdyille mittauksille sopivia. Anturit kiinnitettiin välipohjaan liimaamalla.

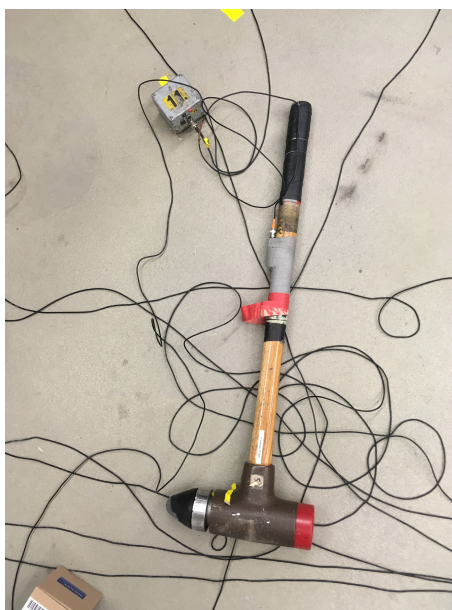
Taulukko 13: Värähtelymittauksissa käytetyt laitteet.

Laite	Malli	Mittauspiste
kiihtyvyysanturi	MMF KS48C	P1-P12
kiihtyvyysanturi	Brüel & Kjær 4370	P13-15, P17-P22
mikrofoni	G.R.A.S 46AE	P16
tallennin	IMC CRONOSflex 400	P1-P8, P13-P20
tallennin	Rion DA-40	P9-P12, P21-P22

Impulssivasaramittauksissa käytettiin 15:tä kiihtyvyysanturia ja kuvan 16 mukaista impulssilekaa, jonka pituus on noin 1,2 m. Lekassa itsessään on voima-anturi, jolloin jokaisesta tuotetusta impulssista saatiin voimasignaali. Käytetty leka tuottaa melko tasaisen taajuusvasteen 1-80 Hz alueella käytetyllä vasarapäällä. Taulukossa 14 nähdään mittauksissa käytettyjä laitteita.

Taulukko 14: Impulssimittauksissa käytetyt laitteet.

Laite	Malli	Mittauspiste
kiihtyvyyssanturi	MMF KS48C	P2-P8
kiihtyvyyssanturi	Brüel & Kjær 4370	P13-P15, P17, P19-P22
impulssileka	Brüel & Kjær Type 8210	P16
tallennin	IMC CRONOSflex 400	P1-P16

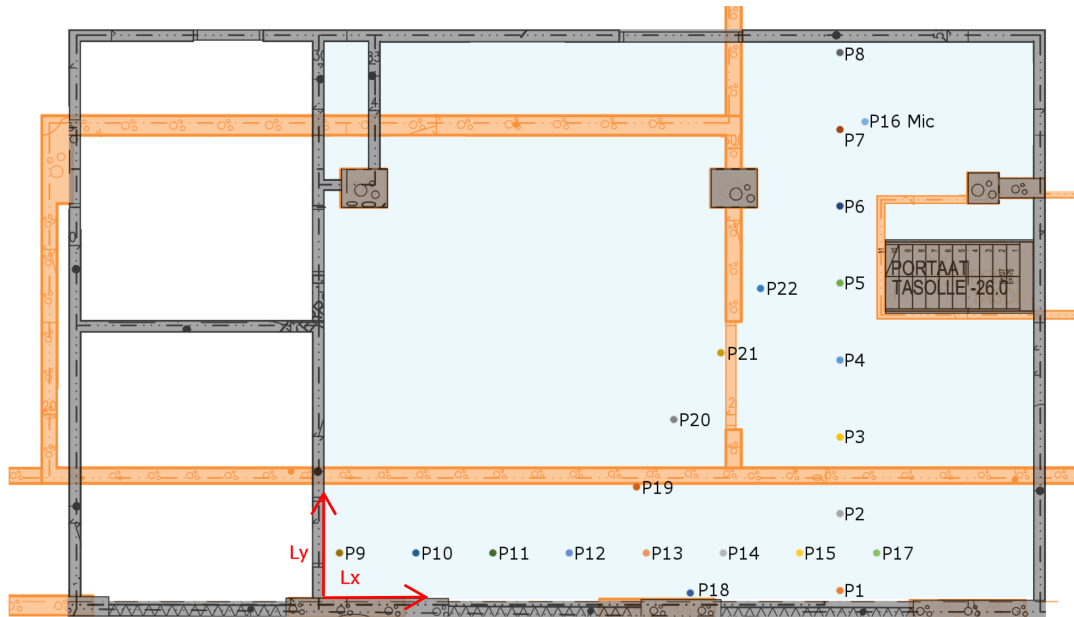


Kuva 16: Impulssivasaramittauksissa käytetty impulssileka.

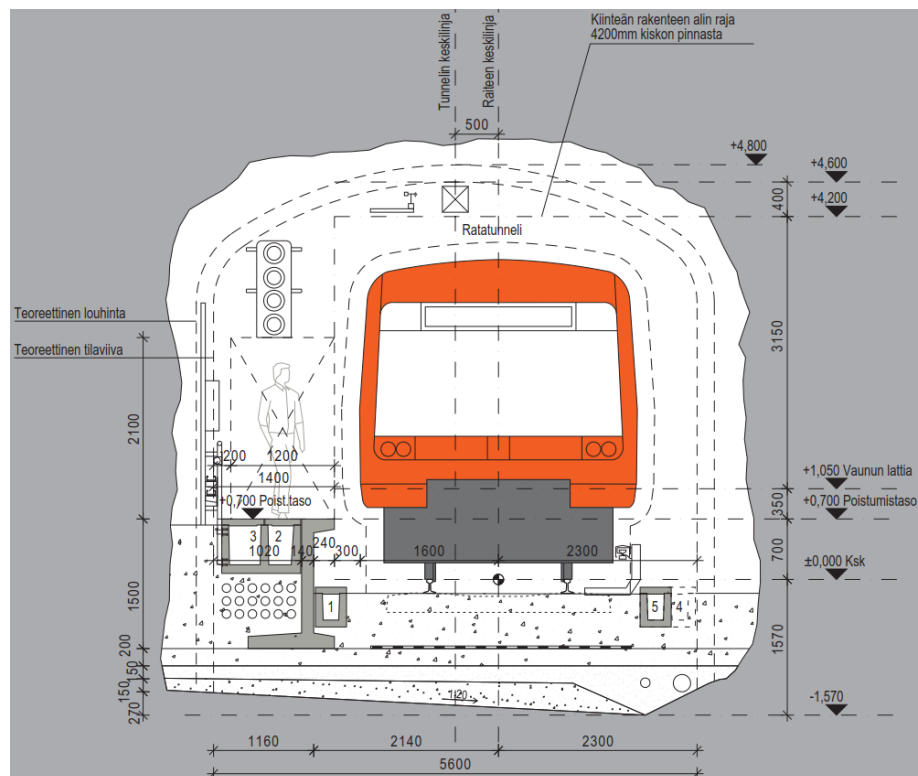
4.1.3 Mittauspisteet

Mittauksissa käytettyjen kiihtyvyyssantureiden positiot nähdään kuvassa 17 ja taulukossa 15. Kuvan sininen alue edustaa käytettyä mittaustilaa. Taulukon etäisyydet on mitattu kuvassa ilmenevän mittaustilan vasemmasta alanurkasta ja niiden perusteella etäisyys raiteen keskilinjaan vaakasuunnassa on myös arvioitu. Itään päin liikennöivän metron raiteen keskilinja sijaitsee vaakasuunnassa noin 3,3 metrin päässä mittaustilan ja tunnelin erottavasta väliseinärakenteesta kuvan 18 mukaisesti.

Lähtökohtaisena ideana oli kartoittaa välipohjalaatta siten, että anturit olisivat eri ominaismuotojen kupukohdissa, jolloin myös välipohjan ominaistuujuudet voitaisiin mitata suuremmalla tarkkuudella. Lisäksi värähtelyn amplitudeja voitaisiin mitata eri pisteissä ja täten myös arvioida ympäröivien rakenteiden vaikutusta värähtelyyn. Pisteet P1-P8 muodostivat kohtisuoran mittauslinjan itään päin liikennöivään metrotunneliin nähden, joka mahdollistaa mm. etäisyysvaimennuksen laskemisen. Mittauspisteet P9-P15 ja P17 muodostivat taas mittauslinjan tunnelin suuntaisesti. Pisteet P12 ja P19-P22 muodostivat diagonaalisen mittauslinjan. Mittauspisteessä P16 sijaitsi mikrofoni värähtelymittausten aikana, mutta impulssivasaramittausten aikana kyseistä mittauspistettä ei käytetty.



Kuva 17: Kiihtyvyyssantureiden positiot P1-P15 ja P17-P22 merkattuna pohjapiirustukseen. Pisteessä P16 oli värähtelymittausten aikana mikrofoni. Vaaleansininen alue kuvaa käytettyä mittaustilaa. Oranssit alueet kuvaavat kellaritason kantavia väliseinärakenteita ja pilareita.



Kuva 18: Poikkileikkaus ratatunnelista. Kuva saatu viitteestä [71].

Taulukko 15: Mittauksissa käytettyjen mittauspisteiden positiot. Etäisyydet mitaustilan vasemmasta alanurkasta (kuva 17) ja raiteen keskilinjasta vaakasuunnassa.

Mittauspisteiden positiot			
Mittauspiste	L_x [m]	L_y [m]	Arvioitu etäisyys raiteen keskilinjaan [m]
P1	6,7	0,1	3,4
P2	6,7	1,1	4,4
P3	6,7	2,1	5,4
P4	6,7	3,1	6,4
P5	6,7	4,1	7,4
P6	6,7	5,1	8,4
P7	6,7	6,1	9,4
P8	6,7	7,1	10,4
P9	0,2	0,6	3,9
P10	1,2	0,6	3,9
P11	2,2	0,6	3,9
P12	3,2	0,6	3,9
P13	4,2	0,6	3,9
P14	5,2	0,6	3,9
P15	6,2	0,6	3,9
P16 Mic	7,1	6,2	9,5
P17	7,2	0,6	3,9
P18	4,8	0,1	3,4
P19	4,1	1,5	4,8
P20	4,6	2,3	5,6
P21	5,2	3,2	6,5
P22	5,7	4,0	7,3

4.2 Välipohjan värähtelymittaukset

Välipohjan värähtelymittaukset suoritettiin käyttäen 21 kiihtyvyysanturia eri puolilla mitaustilan välipohjaa kuvan 17 mukaisesti. Positiossa 16 oli mitausten aikana mikrofoni, jolla pyrittiin äänittämään ohiajavien junien aiheuttamia runkome-lutasoja. Itään päin menevän metrotunnelin ja mitaustilan välisen väliseinäraken-teiden heikosta ilmaäänieristyksestä johtuen todettiin, ettei itään kulkevien junien runkomelutasoja voida luotettavasti määrittää mikrofonilla. IMC CRONOSflex 400-tallentimella metrojen ohiajoja tallennettiin noin 68 minuutin ajan. 18 selkeintä ja suurinta ohiajoa analysoitiin. Tallentimessa käytetty näytteenottotaajuus oli 5000 Hz. Tallentimella RION DA-40 metrojen ohiajoja tallennettiin noin 89 minuutin ajan, joista 26 lähiraiteen ohiajoa analysoitiin. Tallentimessa käytetty näytteenot-totaajuus oli 12800 Hz.

Mitatut kiihtyvyyssignaalit muunnettiin värähtelynopeussignaaleiksi, jotta mitaustuloksia voitaisiin suoraan verrata taulukossa 9 lueteltuihin ohjearvoihin. Ennen

muunnosta kiihtyvyyssignaalit kaistanpäästösuodatettiin taajuusalueelle 1-282 Hz, sillä kiinnostuksen kohteena oli 1-250 Hz:n terssikaistat. Muunnos suoritettiin integraation avulla MATLAB:ssa. Kiihtyvyyssignaalit muunnettiin myös liikepoikkeamaisignaaleiksi, jotta välipohjan liikepoikkeamaa voitaisiin analysoida, mikä etenkin betonirakenteiden taipumisen kannalta on kiinnostavaa. Nopeus- ja liikepoikkeamaisignaalit terssisuodatettiin, jotta metrojen ohiajojen aikaiset huippuarvot terssikaistoitain voitaisiin analysoida.

4.3 Välipohjan impulssivasaramittaukset

Impulssivasaramittauksissa käytettiin 15 kiihtyvyyssanturipistettä, jotka kuvan 17 mukaisesti olivat pisteet P2-P8, P13-P14, P17, P19, P20-P22. Impulssivasaralla herätettiin tilan välipohjaa useassa pisteessä, jotta laatan eri ominaistajuudet saataisiin heräämään. Kiihtyvyyssanturit mittasivat välipohjan vastetta näille tuotetuille impulsseille noin kahdeksan sekunnin ajan. Tuotettujen impulssien herätevoimaa rajoitettiin, sillä mittaustilassa sijaitsevien teknisten laitteiden toimintaa ei haluttu häiritä.

Analyysivaiheessa todettiin 24 impulssiherätteen olleen onnistuneita, joista saatiin yhteensä 360 analysoitavaa mittaussignaalia. Onnistuneiden impulssien määrään vaikutti oleellisesti vallitseva taustavärähtely, joka aiheutui niin ohiajavista metroista kuin vinohissistä. Impulssien tuottaminen piti ajoittaa tiheästi kulkevien metrojen ja vinohissin välille, mikä osoittautui haastavaksi. Mittaussignaalit analysoitiin, joista vartenotettavia signaaleja jäi jäljelle 130 kappaletta. Välipohjan paksuudesta ja jäykkyydestä johtuen mitatut impulssin aiheuttamat värähtelyamplitudit mittauspisteissä, jotka eivät olleet impulssikohdan lähetyvillä, olivat hyvin vähäisiä. Pienen signaalitason ja yleisen taustavärähtelyn välinen signaali-kohinasuhde oli epäsuotava vartenotettavien tulosten saamiseksi.

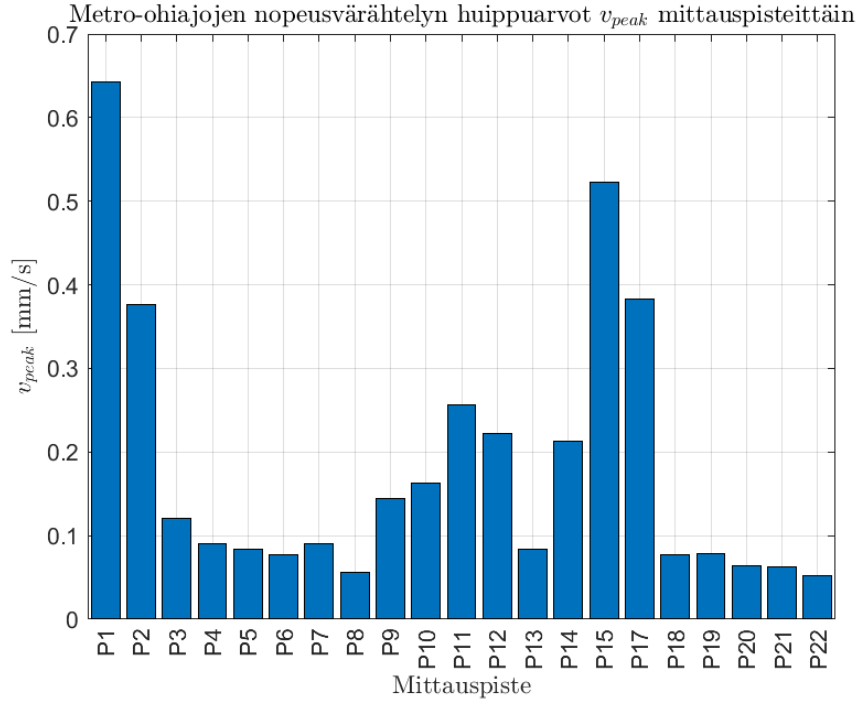
Impulssivasaran tuottamat impulssiherätteet ja kiihtyvyyssantureiden mittaamat impulssivasteet ikkunoitiin noin 300 ms mittaisiksi. Käsiteltävät signaalit eivät täten sisältäneet koko mittausajanjaksoa, josta suurin osa oli taustavärähtelyä. Kyseinen ikkunapituus mahdollistaa yli 4 Hz:n taajuussisällön analysoinnin, joka mitattavan välipohjassa oli riittävää ottaen huomioon laatan jännevälin, jäykkyyden, taustavärähtelyn sekä kiihtyvyyssantureiden taustakohinan. Mobiliteetit laskettiin jokaiselle 24:lle impulssiherätteen mittaussignaalityyppille kaavan 51 mukaisesti, kun taajuusvasteet herätteelle ja impulssivasteille oli laskettu. Yhteensä taajuusvastefunktioita saatiin 360 kappaletta. Ominaisajuuksien oletetusti muodostaessa huippuja taajuusvastefunktioihin, pystyttiin kyseiset taajuudet saamaan. Yhteensä taajuuksia saatiin 1936 kappaletta. Oletettujen ominaistajuuksien suuren määrän vuoksi helpoin tapa niiden analysoimiselle oli laskea histogrammit taajuusjakauman ja esiintymistiheyden selvittämiseksi.

4.4 Tulokset

Tässä osiossa raportoidaan värähtely- ja impulssivasaramittausten tulokset.

4.4.1 Värähtelyn huippuarvot

Kuvassa 19 nähdään kaikissa mittauspisteissä mitattujen metrojen ohiajojen värähtelyn nopeuden huippuarvot v_{peak} . Kuvasta selviää, että neljä suurinta huippuarvoa mitattiin mittauspisteissä P1, P2, P15 ja P17. Kuvasta 17 voidaan todeta näiden pisteiden sijainneen toistensa läheisyydessä itään päin liikennöivän metrotunnelin vieressä. Mitatut huippuarvot olivat 0,64, 0,38, 0,52 ja 0,38 mm/s.

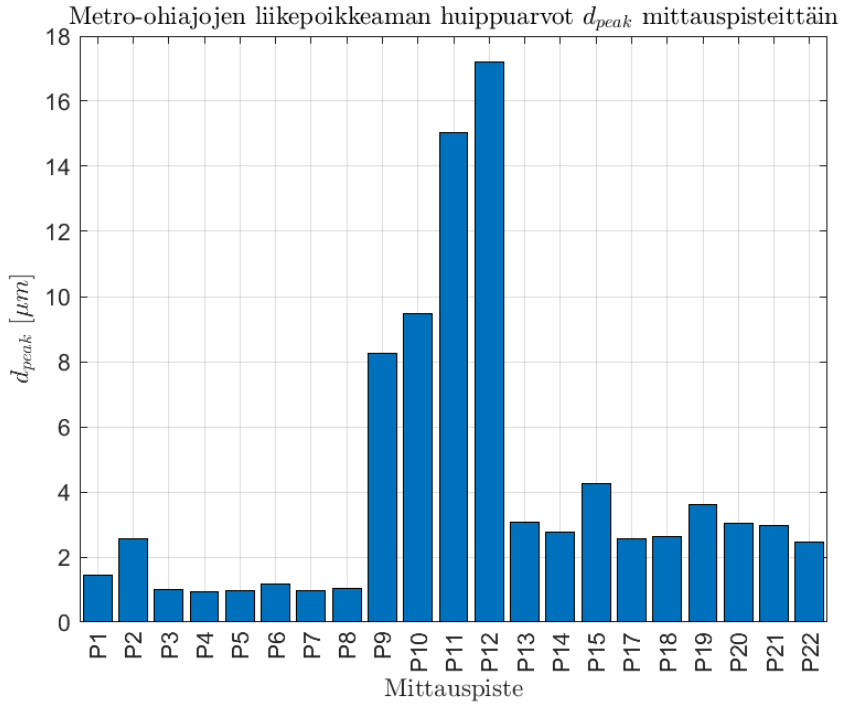


Kuva 19: Metro-ohiajojen nopeusvärähtelyn huippuarvot v_{peak} mittauspisteittäin.

Mittauspisteissä P9-P14 ja P18 huippuarvot eivät ole yhtä suuria, vaikka pisteet sijaitsevat samalla etäisyydellä radasta kuin mittauspisteet P15 ja P17. Myös pisteessä P2 mitattu huippuarvo on suurempi, vaikka se sijaitsi kauempana radasta. Pisteisiin P1, P2, P15 ja P17 metron aiheuttama värähtelyheräte kytkeytyi parhaiten. Yllättävää on raiteen läheisyydessä olleen mittauspisteiden P18 pieni värähtelyn huippuarvo. Pisteiden olleessa hyvin lähellä kellari- ja mittauskellarin kantavia väliseinärakenteita, on kyseinen piste ollut hyvin jäykkä. Tämä asia saattaa selittää suuren eron pisteeseen P1, joka sijaitsi yhtä lähellä raidetta, mutta ei suoraan kantavan rakenteen vieressä. Verrattaessa pisteiden P1-P8 huippuarvojen eroa nähdään värähtelyn vaimentuvan nopeasti etäisyyden kasvaessa. Etenkin pisteiden P1 ja P3 välillä värähtely vaimenee merkittävästi.

Huippuarvot pisteiden P19-P22 muodostamassa vinossa mittauslinjassa olivat alle 0,1 mm/s. Pohjakuvia tarkastellessa nähdään pisteiden alapuolella sijaitsevan kantavia seinärakenteita, jotka oletetusti jäykistävät lattialaattaa. Pisteiden tuloksista voidaan myös nähdä etäisyyden aiheuttaman värähtelyn vaimenemisen. Jo näiden tulosten valossa voidaan todeta metrojen aiheuttamien kokonaisvärähtely-

tasojen olevan hyvin pieniä rakenteiden vaurioitumisen kannalta. Kuvassa 20 nähdään kaikissa mittauspisteissä mitattujen metrojen ohiajojen aikaiset liikepoikkeaman huippuarvot d_{peak} . Liikepoikkeaman tapauksessa suurimmat arvot mitattiin pisteissä P9-P12, jossa mitatut arvot olivat 8,3, 9,5, 15 ja 17,2 mikrometriä. Jälleen voidaan todeta välipohjan olleen hyvin jäykkä ja massiivinen, jonka johdosta liikepoikkeama oli hyvin pientä. Taulukossa 16 luetellaan jokaisessa mittauspisteessä mitatut huippuarvot v_{peak} värähtelykiihtyvyydelle ja d_{peak} liikepoikkeamalle.



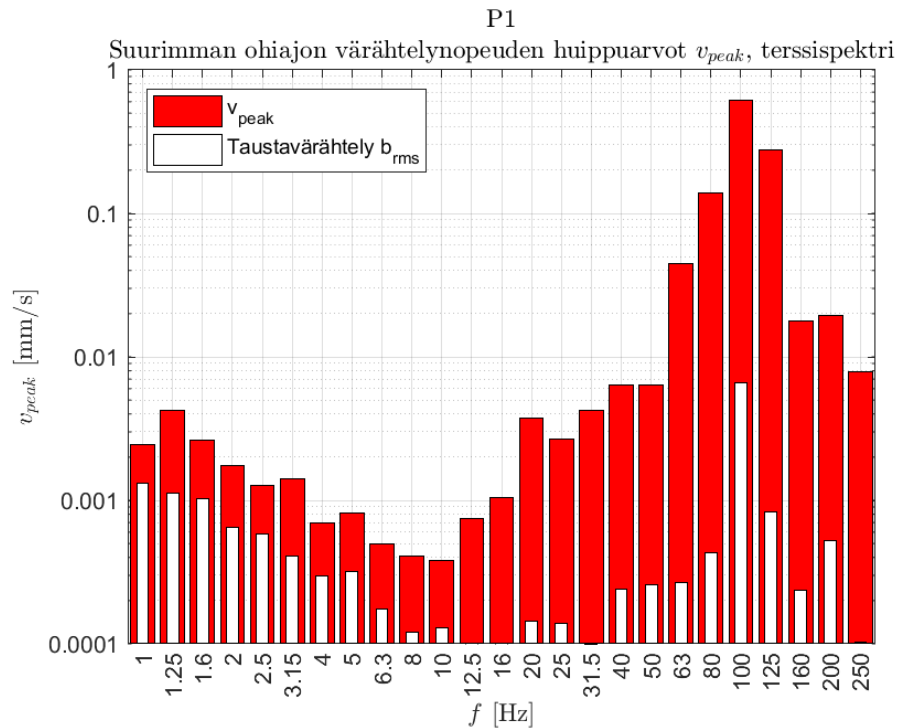
Kuva 20: Metro-ohiajojen liikepoikkeaman huippuarvot d_{peak} mittauspisteittäin.

4.4.2 Terssispektrit

Pelkistä aikatason huippuarvoista ei saada tarkempaa tietoa värähtelyn taajuussisälöstä, joten tässä osiossa tarkastellaan terssisuodatettuja suurimpia metrojen ohiajoja. Kuvissa 21 ja 22 nähdään terssisuodatetut värähtelyn huippuarvot v_{peak} mittauspisteille P1 ja P15, joissa todettiin värähtelyn nopeuden olleen suurinta. Muiden mittauspisteiden ohiajojen terssispektrit löytyvät liitteessä A. Tulosten edustavuuden arvioimiseksi on kuviin lisätty hiljaisen hetken tehollisarvoiset taustavärähtelyt b_{rms} , jotta metron synnyttämän värähtelyn osuus voidaan arvioida.

Taulukko 16: Metrojen ohiajojen värähtelyn huippuarvot mittauspisteittäin.

Mittauspiste	v_{peak} [mm/s]	d_{peak} [μm]
P1	0,64	1,5
P2	0,38	3,4
P3	0,12	1,1
P4	0,09	0,9
P5	0,08	1,0
P6	0,08	1,1
P7	0,09	1,1
P8	0,06	1,1
P9	0,14	8,3
P10	0,16	9,5
P11	0,26	15,0
P12	0,22	17,2
P13	0,08	3,0
P14	0,21	2,8
P15	0,52	4,3
P17	0,38	2,8
P18	0,08	2,9
P19	0,08	4,2
P20	0,06	2,9
P21	0,06	3,0
P22	0,05	2,5



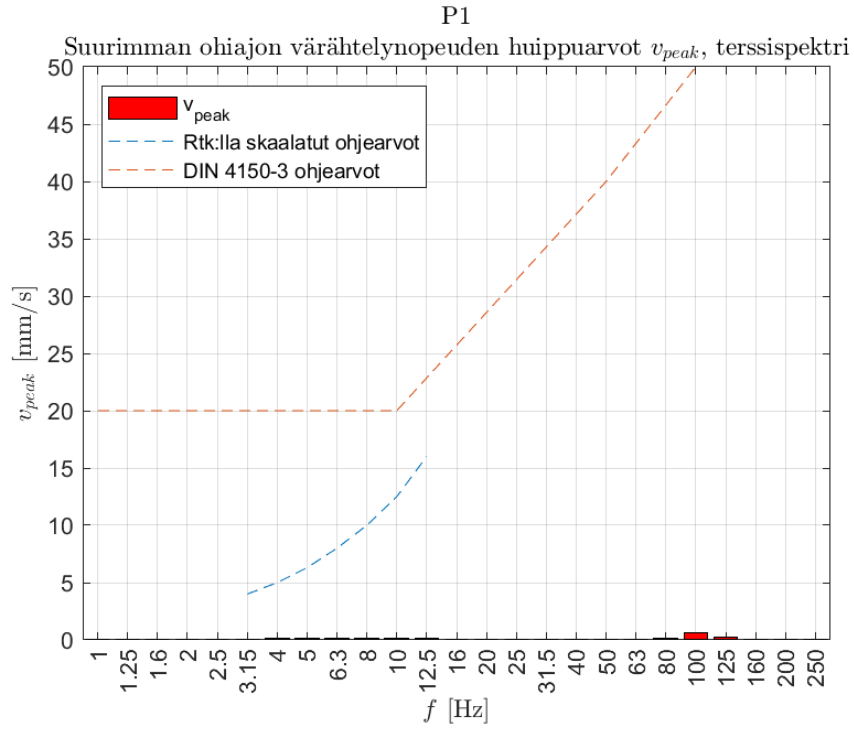
Kuva 21: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P1.



Kuva 22: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P15.

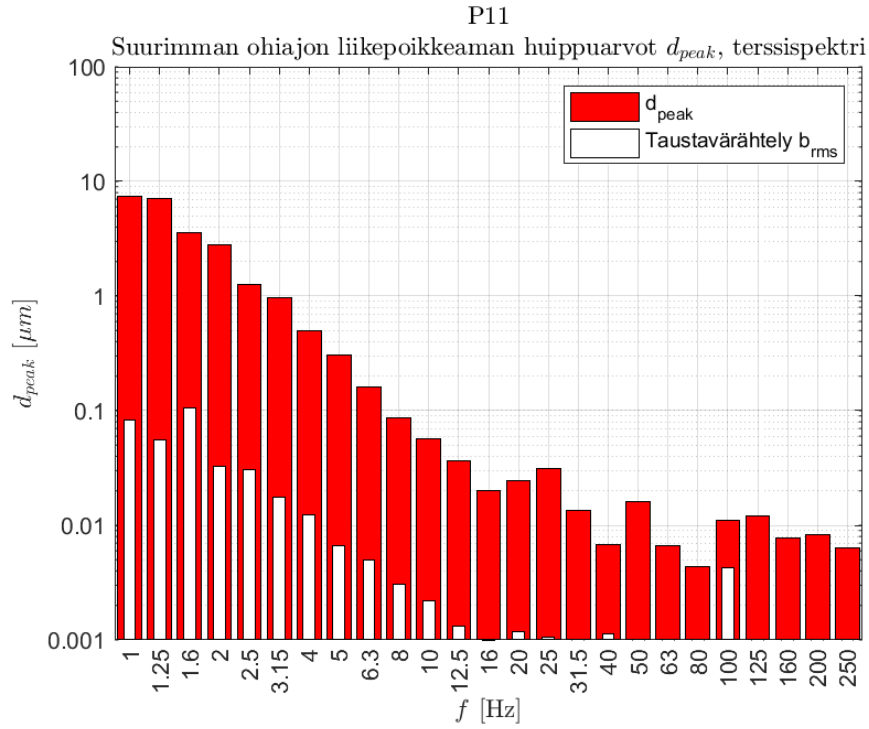
Kuvista havaitaan, että värähtelyä ilmenee erityisesti 100 ja 125 Hz:n terssikaistoilla. Spektreistä nähdään myös, että taulukossa 3 annettu hallitseva taajuus värähtelylle kiinteässä kalliassa (> 50 Hz) pitää paikkansa. Rakenteiden vaurioitumisen kannalta on syytä vertailla värähtelyn huippuarvon tuloksia taulukoissa 7 ja 9 lueteltuihin ohjearvoihin. Kuvaajista 21 ja 22 nähdään selvästi, etteivät annetut ohjearvot ylity millään terssikaistalla, jolloin voidaan päätellä, että rakennusvaurioriskit värähtelyn kannalta ovat hyvin pienet.

Mitatun värähtelyn ja annettujen ohjearvojen havainnollistamiseksi kuvassa 23 nähdään mittauspisteen P1 suurimman ohiajon nopeusvärähtelyn terssikaistat ja rakennustapakertoimella $F_k = 1$ skaalatut värähtelyn ohjearvot v terssikaistoille 3,15 - 12,5 Hz. Lisäksi kuvassa esitellään standardin DIN 4150-3 mukaiset ohjearvot nopeusvärähtelylle taajuuksille 1-50 Hz. Kuvasta nähdään, että mitatut värähtelyn huippuarvot alittavat selkeästi molemmat ohjearvot.

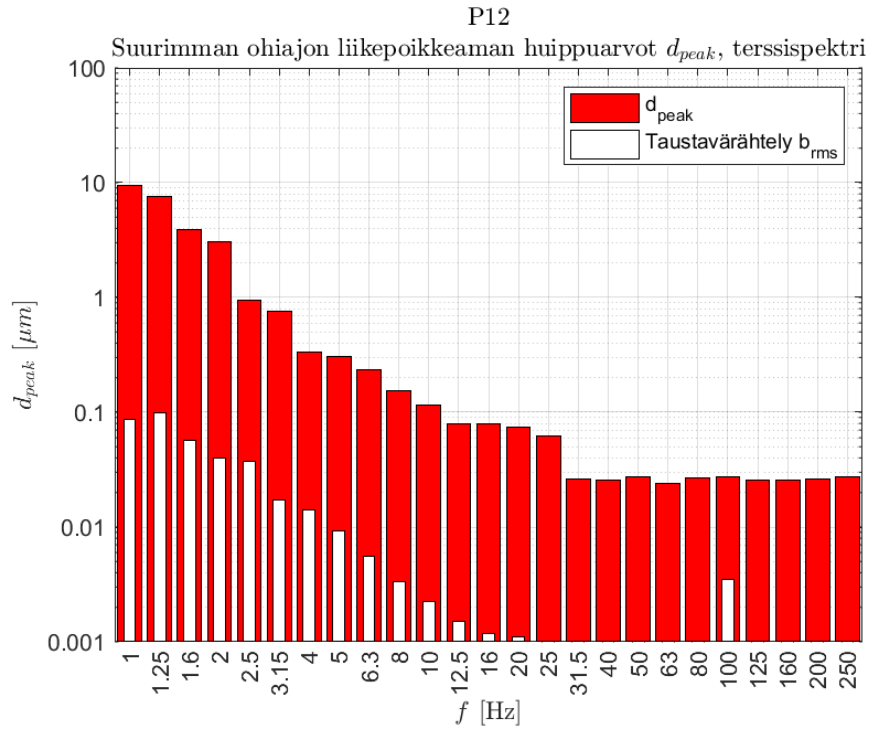


Kuva 23: Mittauspisteen P1 huippuarvot terssikaistoittain, rakennustapakertoimella $F_k = 1.00$ kerrotut värähtelyn ohjearvot ja DIN 4150-3 ohjearvot.

Liikepoikkeaman huippuarvot d_{peak} terssikaistoittain mittauspisteille P11 ja P12 näytetään kuvissa 24-25. Kuvaajista nähdään liikepoikkeaman erottuvan taustavärähtelystä kaikilla taajuuksilla ja esiintyvän pääsääntöisesti matalimmilla taajuuksilla. Muiden mittauspisteiden ohiajojen liikepoikkeaman terssispektrit löytyvät liitteestä A.



Kuva 24: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P11.

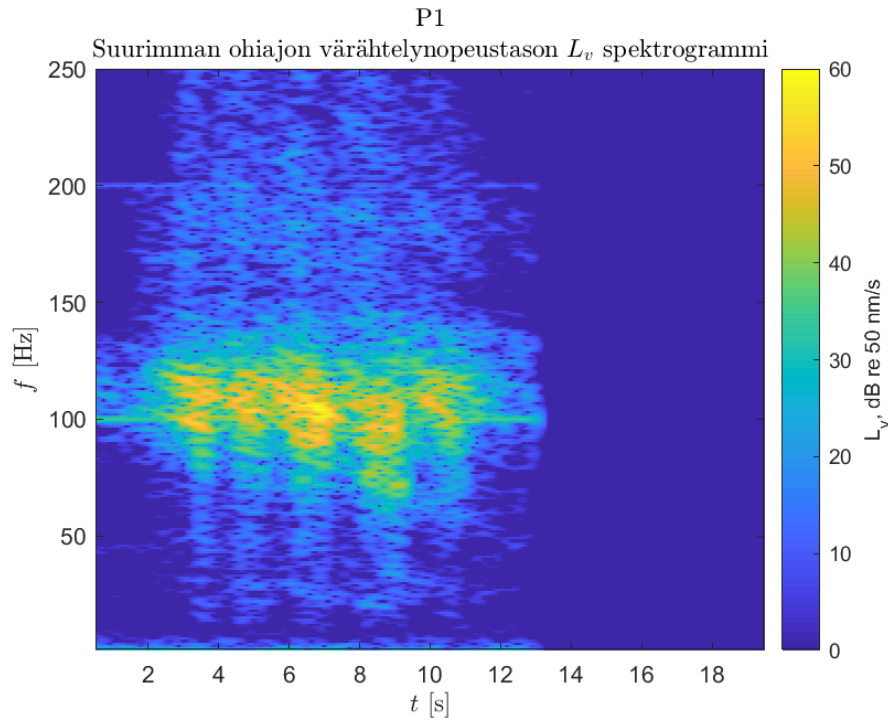


Kuva 25: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P12.

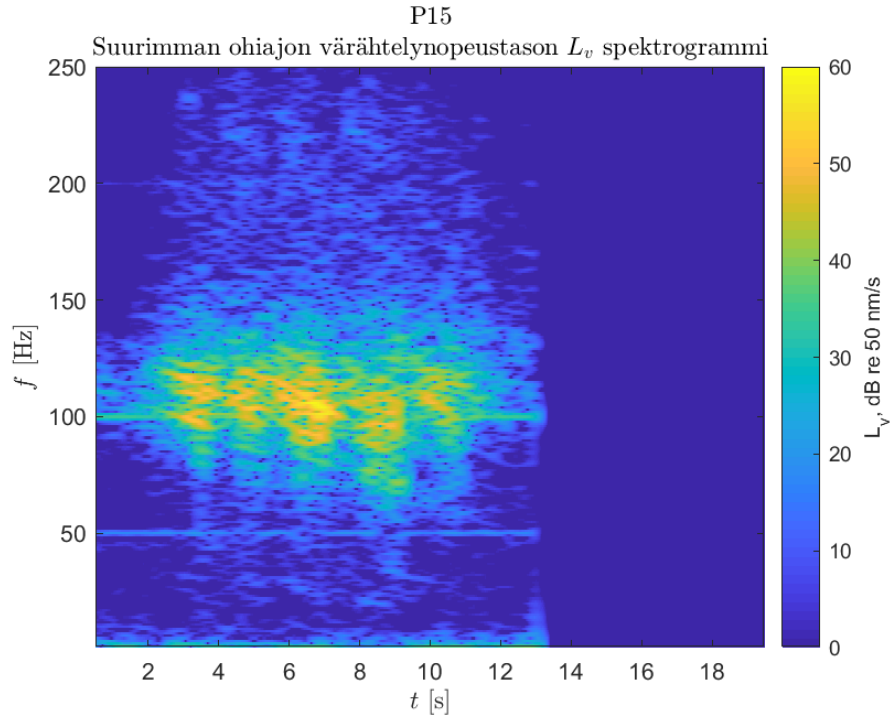
4.4.3 Spektrogrammit

Kuvissa 26 ja 27 nähdään spektrogrammit suurimmista ohiajoista pisteissä P1 ja P15. Muiden mittauspisteiden spektrogrammit löytyvät liitteestä A. Kuvissa y-akseli edustaa taajuutta, x-akseli aikaa ja z-akseli kiihtyvyydestä L_v . Kuvista voidaan ensimmäisenä päätellä metron ohiajon mittauspisteissä kestäneen noin 9 sekuntia. Kuvissa noin 13 sekunnin jälkeen kaikkien taajuuksien amplitudit ovat 0 dB sillä signaalit ovat ikkunoituja. Toinen selvä havainto on, että metron ohiajon taajuussisältö keskittyy selvästi noin 80-125 Hz:n taajuusalueelle. Alle 70 Hz:n ei värähtelyä esiinny merkittävästi.

Kuvista voidaan erottaa viisi ryhmittymää ohiajon aikana. Todennäköisin syy näille on metrojen teliparit eli metron värähtelyherätteen merkittävimmät aiheuttajat. Tarkemmin katsottuna voidaan myös nähdä taajuuksien laskevan ohiajon aikana, minkä sähkömoottoreita ohjaavat taajuusmuuttimet saavat aikaiseksi. Taajuuden laskiessa metron vauhti myös laskee. Mittaustilan vieressä olevan raiteen itään päin kulkevat metrot hidastivat vauhtia pysähtyäkseen metrolaiturille.



Kuva 26: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P1.

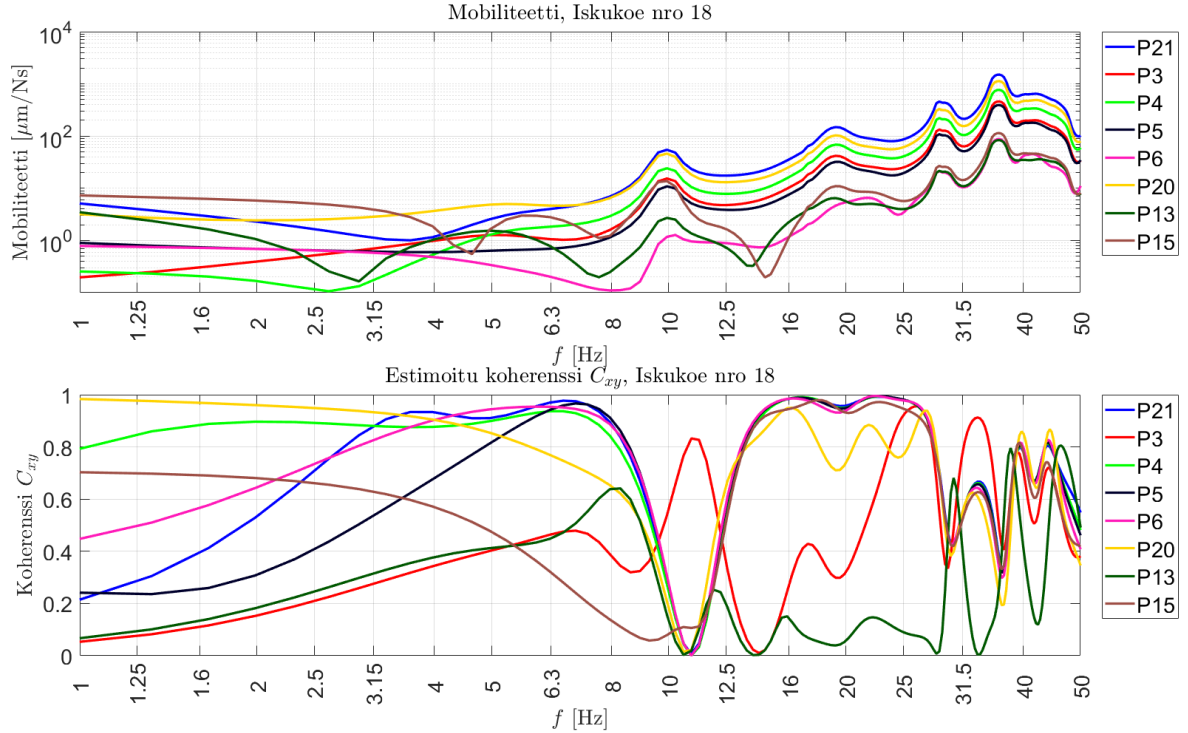


Kuva 27: Suurimman ohiajon värähtelynoipeustason spektrogrammi mittauspisteessä P15.

Mittauksista nähdään myös metrotunnelissa olevan voimakkaan sähkökentän häiriösignaalien kytkeytyneen jonkin verran mittauslaitteistoon. Kuvassa 26 nähdään 100 ja 200 Hz:llä jatkuvat viivat, jotka jatkuvat ennen ja jälkeen metron ohiajon, jolloin näiden taajuuksien voidaan olettaa kuuluvan anturin mittaamaan taustavärähtelyyn. Spektrogrammista 27 taas nähdään taajuuksilla 50 ja 100 Hz:iä vastaavat jatkuvat viivat. Sama ilmiö on myös nähtävissä kuvissa 21, 22, 24 ja 25, joissa etenkin taustavärähtelyn 100 Hz:n terssikaista erottuu selvästi muusta taustavärähtelystä.

4.4.4 Taajuusvaste- ja koherenssifunktiot

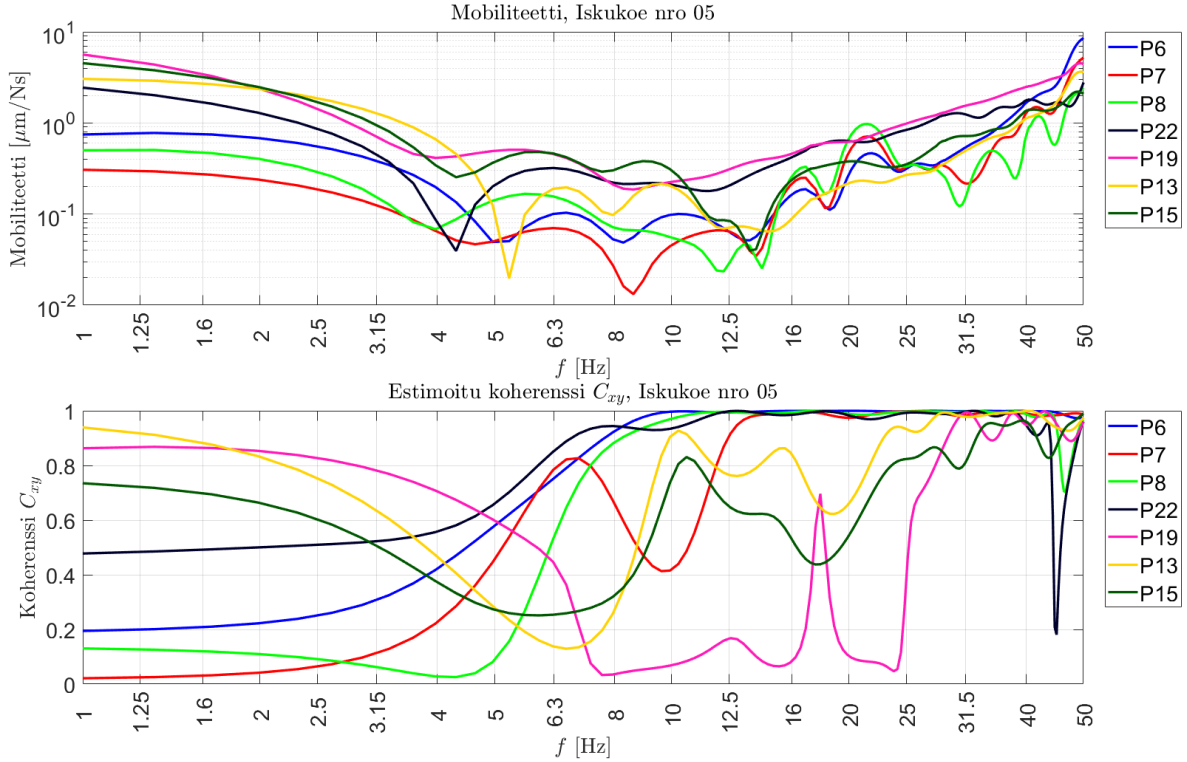
Kuvasta 28 käy ilmi iskukokeen numero 18 mobiliteetti ja koherenssifunktiot mitauspisteille P3-P6, P13-P15 ja P20-P21. Huomioitavaa on, että mobiliteettikuvassa y-akseli on logaritminen. Kyseisten pisteiden taajuusvastefunktiot korreloivat parhaiten toistensa kanssa. 18:n iskun tulokset olivat myös muihin iskuihin verrattuna selkeimmät ja edustavimmat.



Kuva 28: Iskukokeen numero 18 taajuusvaste- ja koherenssifunktio.

Kuvan taajuusvastefunktoista nähdään vasteiden välisten muotojen korreloivan hyvin keskenään etenkin noin 8:sta hertsistä ylöspäin. Vasteilla on selvästi eri amplitudit, joka johtuu herätepisteen ja antureiden välisistä etäisyyksistä. Taajuusvasteissa ilmenee huippukohtia noin 9, 18, 28 ja 36 Hz:n taajuuksilla. Kyseiset taajuudet ovat mitatun rakenteen ominaistajuuksia. Toisaalta vasteista ei nähdä rakenteen alinta ominaistajuuksia, joka on arviolta 5,5-6,5 Hz. Impulssivasara tuottama voima ei riittänyt herättämään massiivisen laatan alimpia ominaistajuuksia niin paljon, että ne olisivat erottuneet selvästi kohteen muun taustavärähtelyn ja kiihtyvyyssantureiden taustakohinan joukosta.

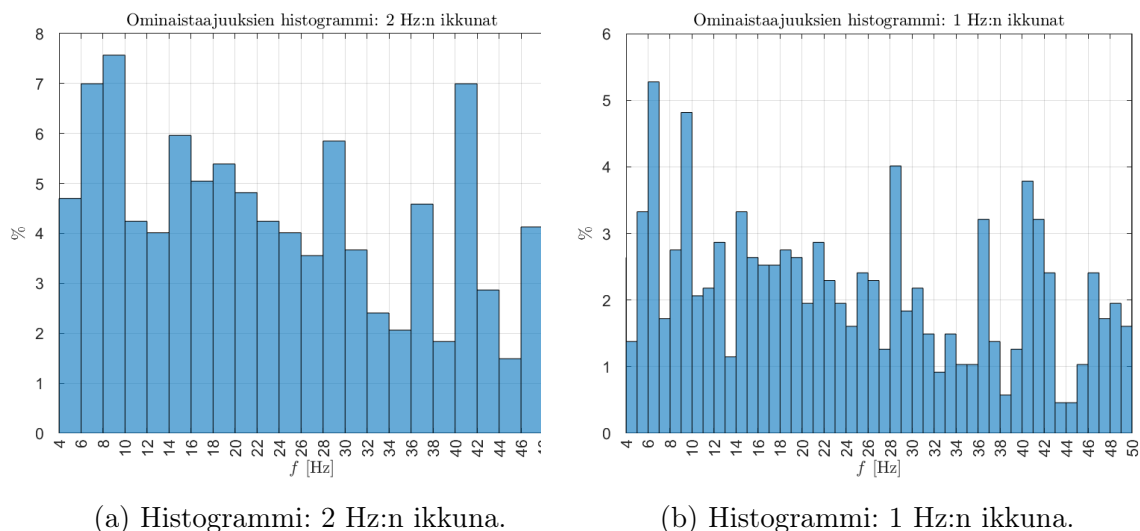
Koherenssifunktioissa nähdään herätteen ja vasteiden välisen koherenssin yleisesti olevan hyvä, mikä lisää tulosten uskottavuutta. Teoriaan viitaten ominaistajuuksien tulisi näkyä koherenssin laskuna. Funktioiden minimiarvot vastaavat karkeasti ominaistajuuksia. Lisäksi noin 42 Hz:llä on minimikohta, mikä voisi viitata mitatun rakenteen ominaistajuuteen tämän taajuuden läheisyydessä. Vertailun vuoksi kuvassa 29 näytetään iskukokeen numero 5 mobiliteetti ja koherenssifunktiot mitauspisteille P6, P7, P8, P13, P15, P19 ja P22, joista nähdään mitatun välipohjan oletettu alin ominaistajuuks noin 6 Hz:n paikkeilla.



Kuva 29: Iskukokeen numero 5 taajuusvaste- ja koherenssifunktio.

4.4.5 Ominaistaajuuudet

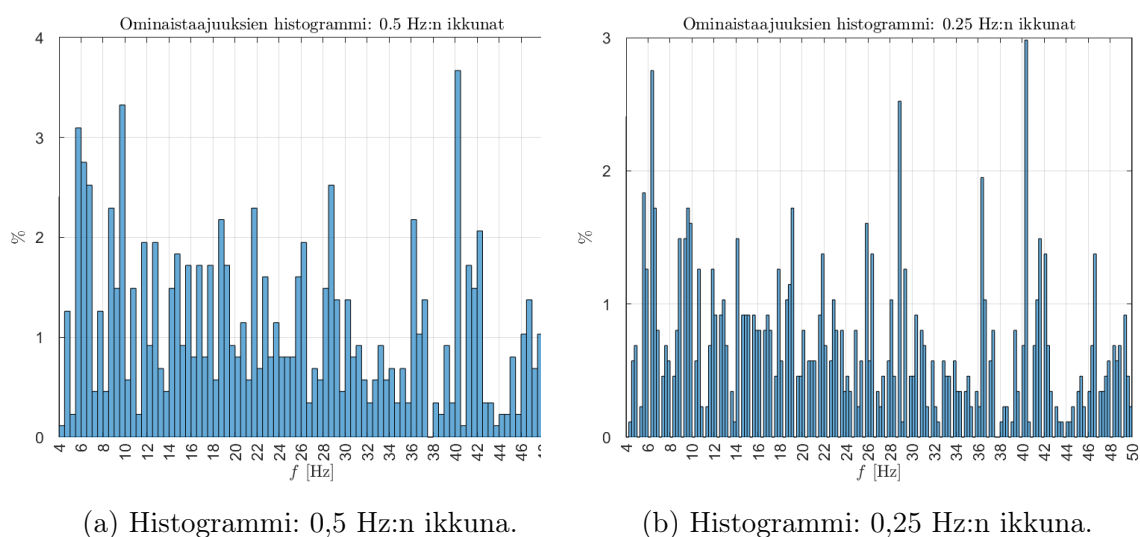
Taajuusvastefunktioista analysoiduista huippuarvoista pyrittiin selvittämään mitatun välipohjan ominaistaajuuudet. Jokainen taajuusvasteessa esiintyvä huippu voi lähtökohtaisesti olla rakenteen ominaistaajuus. Analyysissä päädyttiin histogrammien käyttämiseen, sillä niiden avulla pystytään tilastollisesti määrittämään taajuuksien esiintymistiheys ja parantamaan kohinaisesta datasta saatavien tulosten luotettavuutta. Mikäli joitakin taajuuksia esiintyy muita huomattavasti enemmän, näkyisivät ne histogrammissa ja olisivat todennäköisesti ominaistaajuuksia. Analysoitavaksi taajuusalueeksi valittiin 4-50 Hz taajuusvastefunktioiden tulosten perusteella, sillä mittausepävarmuus alle 4 Hz:n taajuuden oli merkittävä, johtuen taustavärähtelystä ja anturien taustakohinasta. Kyseisellä taajuusalueella huippuarvoja oli yhteensä 872 kappaletta. Histogrammeja päädyttiin tekemään 4 kappaletta käyttäen 2, 1, 0,5 ja 0,25 Hz:n ikkunoita. Kuvissa 30 ja 31 nähdään taajuusdatasta saadut histogrammit. Huomioitavaa histogrammeissa on, että y-akseli esittää prosentuaalista osuutta kaikista taajuusalueen ikkunoista.



(a) Histogrammi: 2 Hz:n ikkuna.

(b) Histogrammi: 1 Hz:n ikkuna.

Kuva 30: Histogrammit ominaistajusmittauksille taajuusalueella 1-50 Hz. Vasemmassa kuvassa 2 Hz:n ikkunat ja oikealla 1 Hz:n ikkunat.



(a) Histogrammi: 0,5 Hz:n ikkuna.

(b) Histogrammi: 0,25 Hz:n ikkuna.

Kuva 31: Histogrammit ominaistajusmittauksille taajuusalueella 1-50 Hz. Vasemmassa kuvassa 0,5 Hz:n ikkunat ja oikeassa 0,25 Hz:n ikkunat.

Taulukossa 17 luetellaan jokaisen histogrammin esille nostamat taajuusalueet. Taajuusikkunan koon pienentäminen johtaa suurempaan ikkunoiden määrään, joka taas johtaa yksittäisten ikkunoiden prosentuaalisen osuuden laskuun. Toisaalta ikkunan pienentämisellä saadaan nostettua esille tiettyjä taajuusalueita, jotka nähdään etenkin histogrammeissa 31a ja 31b.

Taulukko 17: Histogrammeista esille nousevat taajuuudet.

Histogrammi							
2 Hz		1 Hz		0,5 Hz		0,25 Hz	
Taajuusalue	%	Taajuusalue	%	Taajuusalue	%	Taajuusalue	%
6-8	7,0	6-7	5,3	5,5-6	3,1	6,25-6,5	2,8
8-10	7,6	9-10	4,8	6-6,5	2,8	9,25-9,5	1,5
14-16	6,0	12-13	2,9	9,5-10	3,3	9,5-9,75	1,7
18-20	5,4	14-15	3,3	14,5-15	1,8	9,75-10	1,6
28-30	5,8	21-22	2,9	18,5-19	2,2	14-14,25	1,5
36-38	4,6	28-29	4,0	21,5-22	2,3	19-19,25	1,7
40-42	7,0	36-37	3,2	28,5-29	2,5	21,75-22	1,4
46-48	4,1	40-41	3,8	36-36,5	2,2	25,75-26	1,6
		46-47	2,4	40-40,5	3,7	28,75-29	2,5
				42-42,5	2,1	36,25-36,5	1,9
				46,5-47	1,4	40,25-40,5	3,0
				48,5-49	1,3	41,5-41,75	1,5
						42-42,25	1,4
						46,5-46,75	1,4
						49,25-49,5	0,9
Yht (%)	47,5		32,6		28,6		26,4

Taulukossa 17 lueteltujen arvojen perusteella arvioidaan välipohjan ensimmäisten kymmenen ominaistaajuuden olevan taulukossa 18 esiteltujen taajuusalueiden sisällä.

Taulukko 18: Arvioidut taajuusalueet välipohjan 10 ensimmäiselle ominaistaajuudelle.

f_n	Hz
f_0	5,5-6,5
f_1	9,5-10
f_2	14-15
f_3	18,5-19,25
f_4	21,5-22
f_5	28,5-29
f_6	36-36,5
f_7	40,25-40,5
f_8	42-42,5
f_9	46,5-46,75

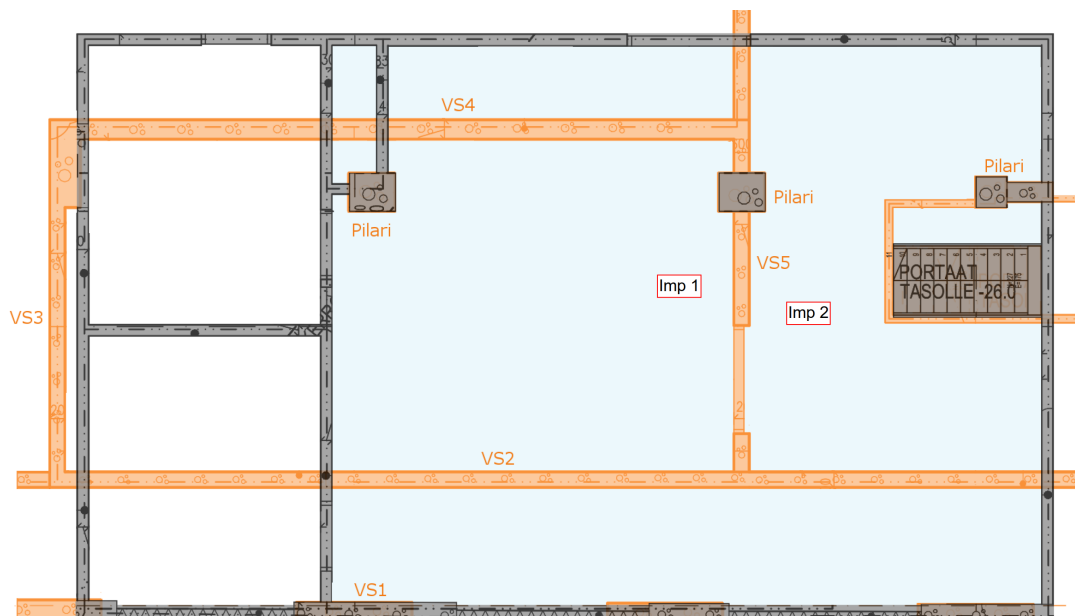
5 Mallinnus

Tämän työn mallinnukset suoritettiin käyttäen AutoDesk Robot-mallinnusohjelmistoa. Mallinnuksen tarkoituksena oli ensisijaisesti ennustaa mittaustilan välipohjan ominaistajuuksia. Malleille, jotka parhaiten ennustivat välipohjan ominaistajuuksia, laskettiin taajuusvastefunktiot. Taajuusvasteiden tarkoituksena ei ensisijaisesti ollut ennustaa nopeusvärähtelyä, vaan pikemminkin tutkia ja arvioida eri ominaistajuuksien välisiä amplitudisuhteita. Etenkin mittaustilan paksun ja jäykän välipohjan suhteen huomattiin, ettei matalia taajuuksia saatu juurikaan heräämään iskukokeiden avulla. Mikäli mallit osoittaisivat vastaavaa käyttäytymistä suuruusluokaltaan vastaaville heränteille, toisivat tulokset lisätietoa ja varmuutta työkalun tarkkuudesta värähtelyn kannalta.

5.1 Mallit

Kuvasta 32 nähdään metroaseman laituritasolla sijainneen mittaustilan ja alla olevien kellaritason tilojen muodostavan varsin monimutkaisia geometrioita. Tämän seikan takia tehtiin useita malleja, jotta eri välipohjaa tukevien rakenteiden vaikutusta pystyttäisiin tutkimaan. Mallinnuksessa päädyttiin yksikerroksisiin malleihin, sillä tarkastelun kohteena oli mittaustilan välipohjarakenne. Monikerroksisissa malleissa moodianalyysityökalu ottaa huomioon rakenteiden muodostaman järjestelmän, jolle lasketaan ominaistajuuksia. Tällöin ei yksittäisen komponentin taajuuksia pystytä analysoimaan. Kysymykseksi herääkin, edustavatko mitatut taajuusvasteet pelkän välipohjan vasteita vai monen rakenteen muodostaman järjestelmän vasteita. Tässä työssä tehtyjen mallinnusten osalta oletettiin vasteiden edustavan pelkkää välipohjaa, jolloin myös yksikerroksiset mallit ovat perusteltuja. Lisäksi mittaus tulosten pohjalta voidaan olettaa impulssivasaran tuottamien impulssien voimien olleen kohtuullisen pieniä, jolloin niiden vaikutus välipohjaa kantaviin rakenteisiin on ollut hyvin pieni.

Malleja tehtiin yhteensä 13 kappaletta, jotta eri kantavien väliseinien vaikutusta voitaisiin tutkia ja myös selvittää, mitkä seinärakenteet ovat mallinnuksen kannalta tärkeimpiä. Oleellinen asia oli myös mallin leveyden L_x vaikutus tuloksiin. Kuvasta 32 nähdään, ettei väliseinä VS1 ole jatkuva kantava rakenne, vaan se muodostuu pätkistä. Tämän vuoksi VS1 mallintamista päätettiin jättää jatkuvana seinärakenteena tutkittuun myös malleissa. Viimeinen huomioitava asia mallinnukseen liittyen oli pilareiden vaikutus. Kuvasta 32 nähdään myös, että väliseinät VS2-VS5 muodostavat yhden selkeän välipohjalaatta-alueen, jonka takia mallinnuksessa päädyttiin kahteen eri leveyteen. Malleista seitsemän kappaletta mallinettiin mittaustilan leveyden $L_x = 9,25$ m mukaisesti. Kuusi kappaletta malleista tehtiin 12,95 metriä leveiksi, jotta ne ulottuisivat väliseinään VS3 asti ja sisältäisivät siten väliseinien VS2-VS5 muodostaman välipohjalaatan.



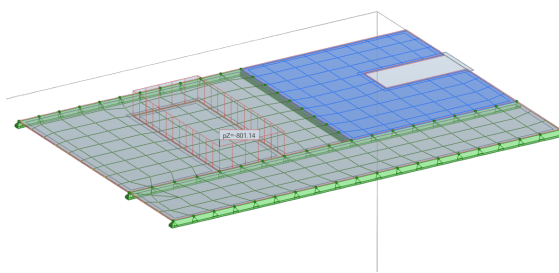
Kuva 32: Mittaustila ja kellaritason tilat päällekkäin. Vaaleansininen alue edustaa mittaustilaa. Oranssit alueet edustavat kellaritason väliseinärakenteita ja pilareita. Kuvaan merkitty malleissa huomioidut väliseinät. Lisäksi kuvaan on merkattu taa-juusvastefunktoiden laskennassa käytettyjä impulssiherätteen pisteitä.

Väliseinän VS1 merkitystä tutkittiin käyttämällä malleissa kahta eri pituutta L_y . Kahdeksassa mallissa L_y oli 6,1 metriä, joka on pituus väliseinien VS1 ja VS4 välillä. Neljässä mallissa käytettiin pituutta 4,37 metriä, joka taas on pituus väliseinien VS2 ja VS4 välillä. Alustavien mallinnuskokeilujen perusteella todettiin mallin rajaamisen väliseinään VS4 asti tuottavan varteenotettavampia tuloksia kuin täyspitkät mallit. Lisäksi neljässä mallissa VS1 mallinnettiin jatkuvana väliseinänä ja neljässä muussa taas pätkinä. Kuudessa mallissa pilarit otettiin huomioon. Yksi malleista tehtiin myös hyödyntäen pelkkää mittaustilan pohjapiirustusta eli tilannetta, joka voisi edustaa alustavaa suunnittelutyötä niukoilla lähtötiedoilla. Tässä tapauksessa oletettiin, että pilarilinjan alapuolella sijaitsisi kantava väliseinärakenne linjan suuntaisesti. Tilan leveytenä L_x ja pituutena L_y käytettiin mittaustilan dimensioita 9,25 ja 7,25 metriä. Taulukossa 19 luetellaan mallien dimensiot, pilareiden huomioonotto sekä VS1 mallinnustapa ja kuvassa 33 nähdään kuvat kaikista malleista.

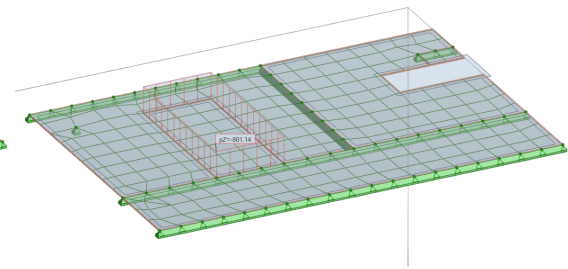
Kaikissa malleissa käytettiin saatujen rakenne- ja pohjapiirustusten mukaista 300 mm paksua teräsbetonilaattaa. Betonin lujuusluokaksi valittiin C50/60. Kellaritason kantavat väliseinät ja pilarit mallinnettiin niveltuellisina tukina. Kaikissa malleissa välipohjan omapaino ja varavaimakoneen aiheuttama staattinen kuorma otettiin huomioon. Mallien elementtiverkkojen tiheydeksi asetettiin 0,5 metriä.

Taulukko 19: Mallinnuksessa käytetyt mallit.

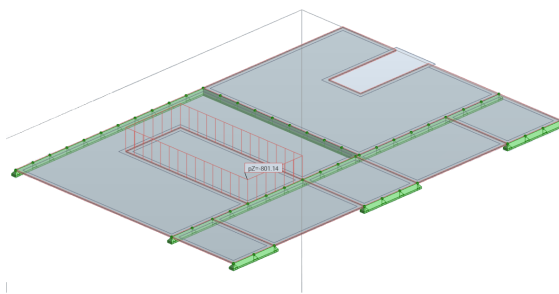
Malli	L_x [m]	L_y [m]	Pilarit huomioitu	VS1 mallinnus
1	9,25	6,1	-	jatkuvana
2	9,25	6,1	x	jatkuvana
3	9,25	6,1	-	pohjakuvan mukaisesti
4	9,25	6,1	x	pohjakuvan mukaisesti
5	12,95	6,1	-	jatkuvana
6	12,95	6,1	x	jatkuvana
7	12,95	6,1	-	pohjakuvan mukaisesti
8	12,95	6,1	x	pohjakuvan mukaisesti
9	12,95	4,37	-	-
10	9,25	4,37	-	-
11	12,95	4,37	x	-
12	9,25	4,37	x	-
13	9,25	7,25	-	-



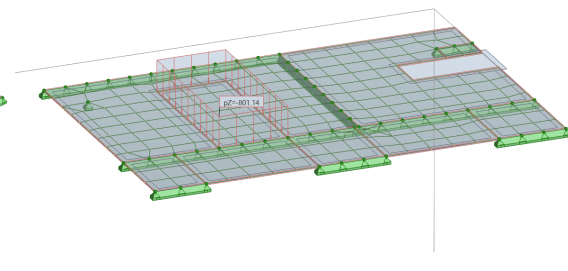
(a) Malli 1.



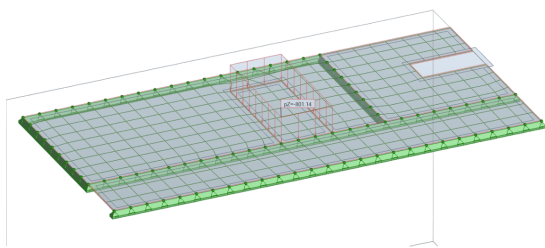
(b) Malli 2.



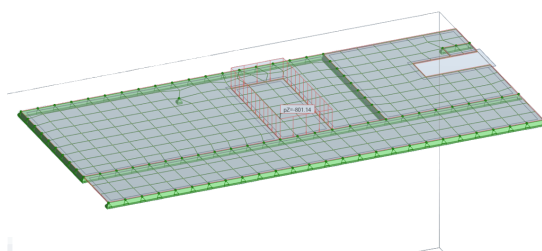
(c) Malli 3.



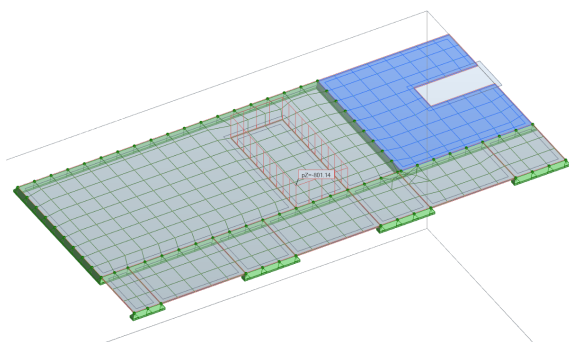
(d) Malli 4.



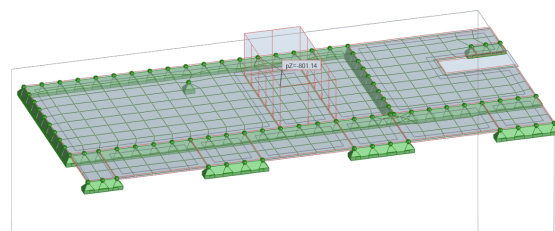
(e) Malli 5.



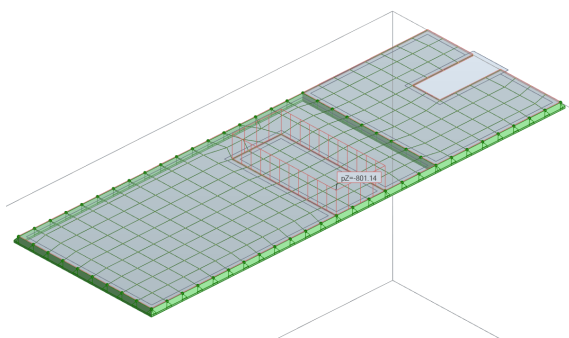
(f) Malli 6.



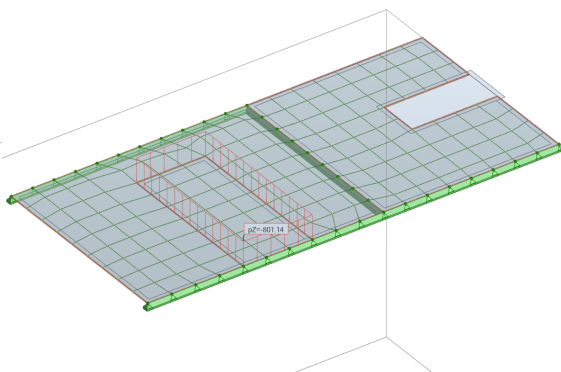
(g) Malli 7.



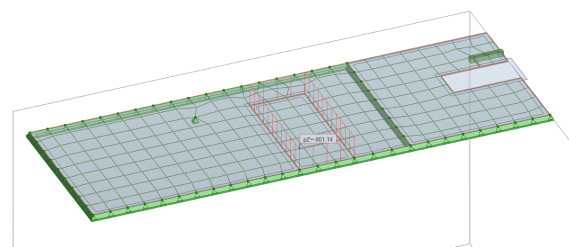
(h) Malli 8.



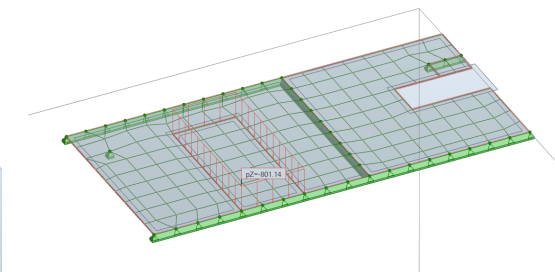
(i) Malli 9.



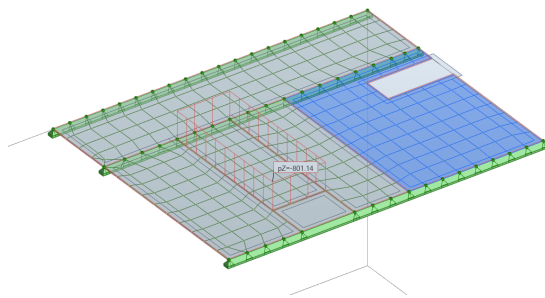
(j) Malli 10.



(k) Malli 11.



(l) Malli 12.



(m) Malli 13.

Kuva 33: Kuvat kaikista malleista.

5.2 Ominaistaajuudet

Mallien ominaistaajuuksien selvittämiseksi käytettiin Robotin moodianalyysityökalua, joka ottaa huomioon staattiset voimat, eli välipohjan omapainon ja varavoimakoneen staattisen kuorman. Tehtyjen mittausten tapauksessa kyseinen analyysitapa antanee parhaat tulokset, sillä etenkin varavoimakoneen painon merkitys ominaistaajuuksiin voi olla merkittävä. Moodianalyysi suoritettiin liitteen B kuvan B1 mukaisilla parametreilla.

5.3 Taajuusvastefunktiot

Mittausten alustavien ominaistaajuustulosten perusteella mallit 3, 7, 9 ja 10 valittiin taajuusvastefunktiomallinnukseen, sillä niiden ominaistaajuudet olivat lähellä mittaustuloksia. Mallit 3 ja 7 edustavat todellisia mitattuja rakenteita parhaiten. Vertaamalla kyseisiä malleja malleihin 9 ja 10 voidaan arvioida mallien yksinkertaistamisen vaikutuksia.

Impulssivasaran voimatietoja hyödyntämällä laskettiin 24 tuotetun impulssin voimakeskisarvon olleen noin 0,5 kN. Kyseistä arvoa käytettiin malleissa simuloimaan impulssiherätteitä, joilla taajuusvastefunktiot laskettiin. Impulssit simuloitiin staattisina solmukuormina taulukon 20 mukaisissa pisteissä. Robot tulkitsee annettun staattisen kuorman herätevoiman amplitudina. Etäisyydet on laskettu mittaustilan eli kuvan 14 mukaisen pohjapiirustuksen vaaleansinisen alueen vasemmasta alanurkasta. Impulssipisteet valittiin edustaviksi todettujen impulssimittausten perusteella, sillä suuri osa impulsseista tuotettiin kyseisten pisteiden läheisyydessä.

Taulukko 20: Mallinnettujen impulssiherätteiden positiot.

Impulssi	L_x [m]	L_y [m]
1	6,2	3,8
2	4,5	4,2

Malleille 3 ja 7 laskettiin taajuusvastefunktiot mittaustasossa P4-P7, P13, P15, P20 ja P22. Taajuusvastefunktiot malleille 9 ja 10 laskettiin taas tasossa P4-P7, P20 ja P22, sillä pisteet P13 ja P15 sijaitsivat kyseisten mallien mallinnusalueen ulkopuolella. Analysoitavat mittauspisteet valittiin mittausten mobiliteetteja analysoitaessa sillä perusteella, että kyseisissä pisteissä esiintyi edustavia taajuusfunktioita suurimmalla frekvenssillä. Mittauspisteille laskettiin vastefunktiot taajuusalueella 1-50 Hz, liitteen B kuvan B2 mukaisesti.

Robotin laskelmatuloksista valittiin nopeusvärähtelyn arvot, jotka tuotiin MATLAB:iin piirrettäväksi. Huomioitavaa on, että Robot taajuusvastefunktiot eivät suoraan ole verrattavissa mitatuille vastefunktioille. Mallien taajuusvastefunktiot ilmoittavat nopeusvärähtelyn arvot käytetyn herätteen amplitudille, eivätkä värähtelyn nopeutta per newton. Vertailukelpoisempien kuvaajien saamiseksi taajuusvastefunktioiden arvot on jaettava käytetyllä 500 N:n herätteellä. Toisaalta, taajuusvasteiden amplitudiin jakaminen herätteen amplitudilla ei muuta vasteiden amplitudijakaumaa, jolloin tulokset ovat riittäviä ja tarkastelukelpoisia. Tämän työn osalta etenkin vasteiden amplitudijakaumat ovat mielenkiintoisia, sillä ne kertovat paljon mallinnusmenetelmän rakenteiden käyttäytymisestä ominaisuutensa ja ominaistajuuksien osalta.

5.4 Tulokset

5.4.1 OminaistajuuDET

Taulukossa 21 luetellaan moodianalyysityökalun laskemat 10 ensimmäistä ominaistajuutta kaikille malleille. Robotin ennustamat taajuudet sijoittuvat 4,5 - 59,1 Hz:n taajuusalueelle.

Taulukko 21: Mallinnustulokset 10:lle ensimmäiselle ominaistajuudelle.

f_n [Hz]	Malli												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
f_0	6,8	7,6	6,7	7,6	7,0	7,7	6,9	7,7	5,9	5,7	6,8	6,6	4,5
f_1	9,7	19,1	9,7	19,0	9,7	19,1	9,7	19,0	9,0	9,0	17,7	17,6	13,1
f_2	18,9	25,6	18,8	25,6	18,9	25,9	18,9	25,9	17,6	17,5	24,2	23,4	13,8
f_3	22,6	33,4	22,6	33,3	23,5	33,4	23,5	33,4	21,7	20,8	26,1	25,3	16,4
f_4	32,6	38,7	32,5	38,6	32,6	38,7	32,5	38,6	24,4	24,3	37,1	37,2	26,8
f_5	38,7	41,9	38,6	41,9	37,4	40,7	37,2	40,5	33,7	37,1	37,8	40,7	31,6
f_6	41,5	43,2	41,5	43,2	38,7	42,1	38,6	42,1	37,1	40,0	41,8	42,1	33,1
f_7	42,2	53,9	42,2	53,9	41,7	43,7	41,7	43,7	40,6	40,8	55,2	53,9	37,3
f_8	44,8	57,4	44,8	57,4	43,2	56,2	43,2	56,2	42,6	43,0	56,2	54,8	38,8
f_9	52,3	59,1	52,3	59,1	53,8	58,6	53,8	58,6	51,4	51,6	59,1	57,4	43,7

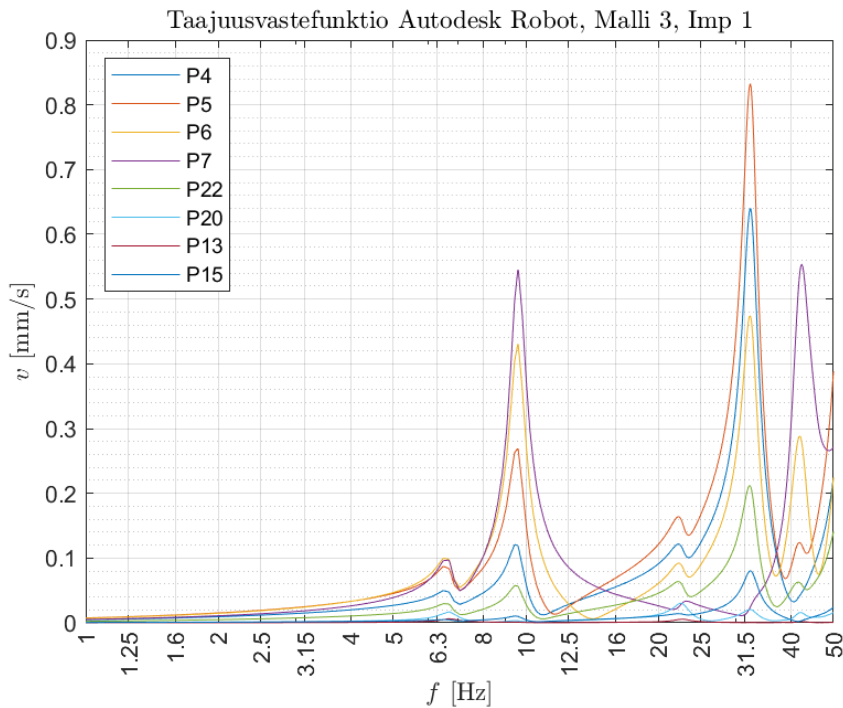
Taulukosta nähdään malleilla olevan matalin ominaistajuus 4,5 - 7,7 Hz:n taajuusalueella. Pilareiden vaikutus malleissa 2, 4, 6, 8, 11 ja 12 näkyy etenkin toisessa ennustetussa ominaistajuudessa. Pilarimalleissa 2, 4, 6 ja 8 myös alin ominaistajuus

on hieman korkeampi verrattaessa malleihin, joissa pilareita ei otettu huomioon. Pilarimallien korkeimmat ominaistajuuudet ovat myös selvästi korkeampia. Alustava mittaustuloksiin vertailu osoittaa pilarimallien tulosten olevan epäsuotuisia, jonka vuoksi niitä ei enää käsitellä tässä osiossa.

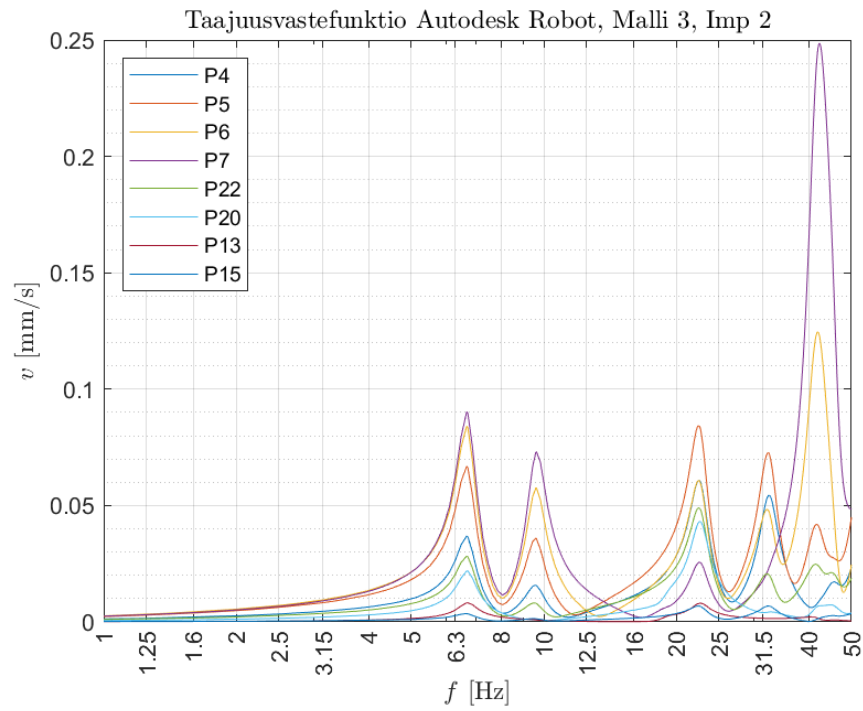
Mallin 13 osalta, joka mallinettiin hyödyntäen pelkkää mittaustilan pohjapiirustusta, ominaistajuuudet poikkeavat huomattavasti muista malleista. Alin ominaistajuuus on matalin kaikista malleista. Lisäksi ominaistajuuksien f_2 ja f_3 tajuudet poikkeavat selkeästi muiden mallien ennustamista tajuuksista. Mallin tulosten perusteella voidaan todeta kantavien rakenteiden sijaintien vaikuttavan merkittävästi ominaistajuuksiin. Mallien leveys L_x ei näyttäisi vaikuttavan merkittävästi ominaistajuuustuloksiin verrattaessa malleja 1, 3, 5 ja 7. Suurempi vaikutus on mallien pituudella L_y , eli väliseinien VS1-VS2 välisen välipohja-alueen huomioonotto mallinnuksessa. Pituudeltaan lyhyemmillä malleilla ensimmäiset kolme ominaistajuuutta ovat matalampia verrattuna pidempiin malleihin. Kellaritason väliseinän VS1 mallinnustavalla ei juurikaan näytä olevan vaikutusta.

5.4.2 Tajuusvastefunktiot

Kuvissa 34-35 nähdään Robotin laskemat tajuusvastefunktiot malleille 3 ja 9. Liitteestä C löytyvät myös tulokset malleille 7 ja 10.

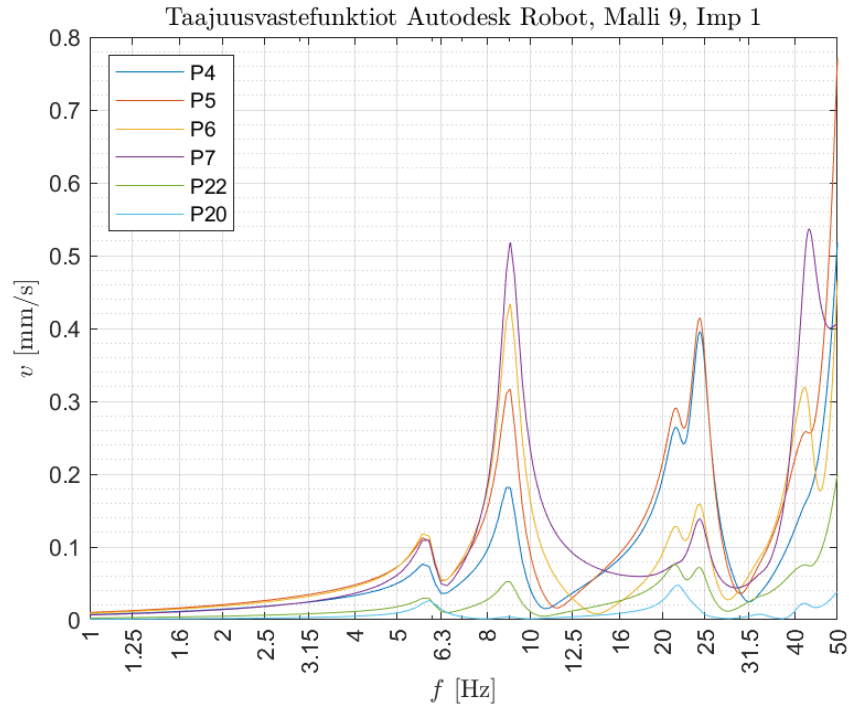


(a) Imp 1: tajuusvastefunktiot.

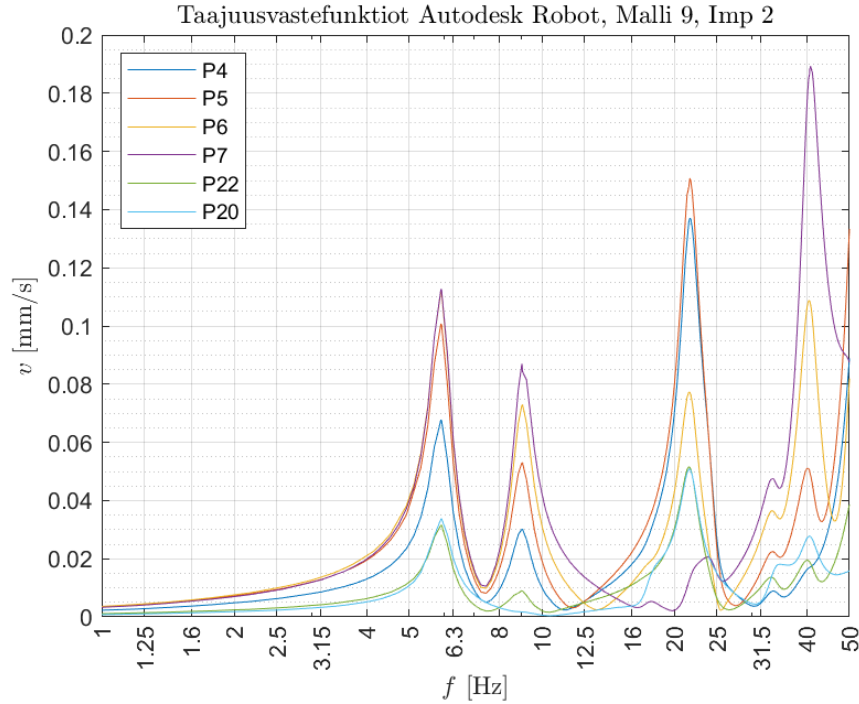


(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva 34: Mallille 3 lasketut taajuusvastefunktiot.



(a) Imp 1: taajuusvastefunktiot.



(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva 35: Mallille 9 lasketut taajuusvastefunktiot.

Kuvaajista nähdään heräte- ja analysoitavien pisteiden sijaintien vaikutus vasteiden ominaistajuuksien amplitudeihin. Tuloksista voidaan todeta herätteen position vaikuttavan merkittävästi ominaistajuuksien heräämiseen. Mallinnettu impulssi 1 ei näyttäisi herättävän alinta ominaistajuuksia kovinkaan voimakkaasti verrattuna muihin ominaistajuuksiin. Impulssin numero 2 tapauksessa taas alin ominaistajuus herää kohtalaisen voimakkaasti suhteessa muihin ominaistajuuksiin. Yleisesti ottaen ensimmäinen impulssi aiheuttaa selkeästi suuremmat amplitudit nopeusvärähtelylle.

Mittauspositiot vaikuttavat myös oleellisesti vasteiden amplitudijakaumaan. Tähän vaikuttavat niin etäisyydet herätteeseen kuin mittauspisteissä esiintyvät eri ominaismuotojen kupu- ja solmukohdat. Tulosten perusteella voidaan todeta, että Autodesk Robot ottaa huomioon todenmukaisesti mallinnettujen välipohjien ominaismuodot ja ominaisuudet.

6 Tulosten vertailu

Tässä kappaleessa vertaillaan kappaleissa 4 ja 5 esitetyt mittaus- ja mallinnustulokset ominaistajaajuuksien ja taajuusvastefunktioiden osalta. Tavoitteena on tarkastella mittaus- ja mallinnusmenetelmien keskinäistä soveltuvuutta ja mahdollisuuksia rakenteiden värähtelyn vaikutusten arvioinnissa.

6.1 Ominaistaajaajuudet

Tulososiossa 5.4.1 todettiin lyhyesti pilarimallien toiseksi alimpien ominaistaajaajuuksien poikkeavan huomattavasti mittaustuloksista. Lisäksi mallin 13 tulokset vaikuttivat alustavassa vertailussa poikkeavan paljon mittaustuloksista. Tämän takia mitatut ominaistaajaajuudet vertaillaan mallien 1, 3, 5, 7, 9 ja 10 tulosten kanssa. Taulukossa 22 luetellaan mitatut ja kyseisten mallien ominaistaajaajuudet ja taajuudelliset erot tulosten välillä. Huomioitavaa on, että ominaistaajaajuuksien lukujärjestys n on määritetty mittaustulosten mukaan ja mallien ominaistaajaajuudet on sovitettu niiden mukaisesti. Tämä tarkoittaa mitattujen taajuuksien $f_3 - f_9$ vastaavan mallien taajuuksia $f_2 - f_8$, sillä mitattua ominaistaajaajuutta f_2 ei ennustettu malleissa. $f_{n,avg}$ on taulukossa 18 ehdotettujen taajuusalueiden keskiarvot ja Δf_{avg} on mallien ominaistaajaajuuksien erotus keskiarvosta f_{avg} . Mallien taajaajuudet, joiden poikkeamat ovat $-0,5 \text{ Hz} < \Delta f < 0,5 \text{ Hz}$, on merkitty taulukkoon vihreällä. Taajuuspoikkeamat $-1 \text{ Hz} < \Delta f < 1 \text{ Hz}$ ovat taas merkittynä sinisellä.

Taulukon tuloksista nähdään, että lähimmäksi mitattua ja ehdotettua alinta ominaistaajaajuutta pääsivät mallit 9 ja 10. Toiseksi alimman taajuuden tapauksessa mallit 1, 3, 5 ja 7 pääsivät hyvin lähelle mitattuja taajuuksia. Yllättävää on, että kolmatta ehdotettua ominaistaajaajuutta f_2 eivät mallit osanneet ennustaa. Tähän voi mahdollisesti vaikuttaa, että jotain oleellista rakennetta ei otettu huomioonotto mallinnuksessa. Toinen mahdollinen syy on se, että kyseinen taajuus ei ole ominaistaajaajuus, vaikka sen frekvenssi histogrammeissa niin ehdottaisi.

Ominaistaajaajuuden f_3 tapauksessa mallit 1, 2, 3 ja 7 olivat lähimpänä mitattuja taajuuksia. Taajuuksille $f_4 - f_9$ nähdään mallien epätarkkuuden nousevan. Toisaalta, näillekin taajuuksille malleista löytyi lähellä olevia taajuuksia seuraavasti (mallit järjestetty nousevassa tarkkuusjärjestyksessä):

- f_4 - mallit 9, 1, 3 ja 4
- f_6 - mallit 10 ja 7
- f_7 - malli 5
- f_8 - mallit 1, 3, 5 ja 7

Tulosten vertailun perusteella voidaan todeta mallien ennustavan mitatun välipohjarakenteen ominaistaajaajuudet varsin hyvin. Mitattujen ja mallinnettujen taajuuksien pienin poikkeama oli 0,01 Hz ominaistaajaajuudelle f_3 (mallit 1 ja 7). Suurin poikkeama oli 4,36 Hz ominaistaajaajuudelle f_5 (malli 9), jos ominaistaajaajuutta f_2 , jota mallit eivät pystyneet ennustamaan, ei huomioida vertailussa.

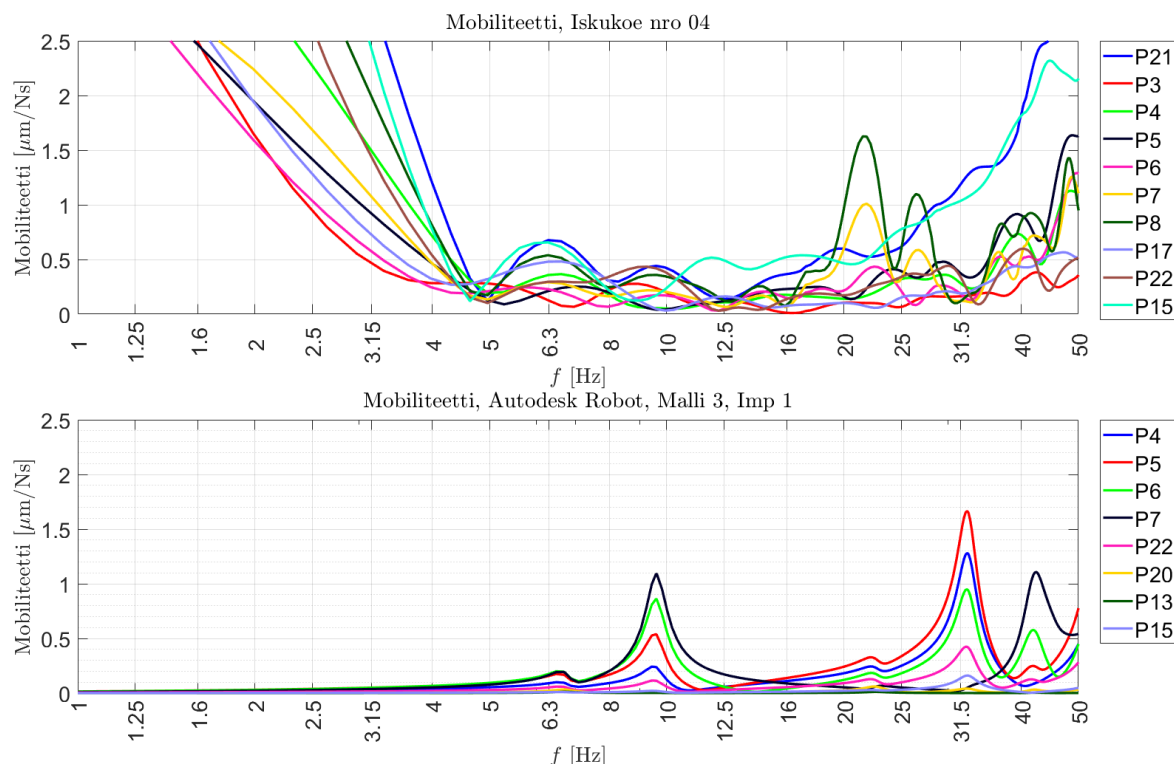
Taulukko 22: Mitattujen ja mallien ominaistajuuksien vertailu.

Mitatut		Mallit					
$f_{n,avg}$	[Hz]	1	Δf_{avg}	3	Δf_{avg}	5	Δf_{avg}
f_0	6,00	6,77	0,77	6,74	0,74	6,95	0,95
f_1	9,75	9,65	-0,10	9,65	-0,10	9,66	-0,09
f_2	14,50	-	-	-	-	-	-
f_3	18,88	18,89	0,01	18,83	-0,05	18,93	0,05
f_4	21,75	22,64	0,89	22,64	0,89	23,52	1,77
f_5	28,75	32,55	3,80	32,49	3,74	32,57	3,82
f_6	36,25	38,66	2,41	38,55	2,30	37,36	1,11
f_7	40,38	41,47	1,09	41,49	1,11	38,65	-1,73
f_8	42,25	42,20	-0,05	42,20	-0,05	41,73	-0,52
f_9	46,63	44,81	-1,82	44,80	-1,83	43,16	-3,47
$f_{n,avg}$	[Hz]	7	Δf_{avg}	9	Δf_{avg}	10	Δf_{avg}
f_0	6,00	6,91	0,91	5,92	-0,08	5,65	-0,35
f_1	9,75	9,66	-0,09	9,01	-0,74	8,99	-0,76
f_2	14,50	-	-	-	-	-	-
f_3	18,88	18,87	-0,01	17,55	-1,33	17,52	-1,36
f_4	21,75	23,51	1,76	21,68	-0,07	20,78	-0,97
f_5	28,75	32,49	3,74	24,39	-4,36	24,30	-4,45
f_6	36,25	37,15	0,90	33,66	-2,59	37,14	0,89
f_7	40,38	38,57	-1,81	37,10	-3,28	40,02	-0,36
f_8	42,25	41,72	-0,53	40,56	-1,69	40,83	-1,42
f_9	46,63	43,15	-3,48	42,56	-4,07	42,96	-3,67

6.2 Taajuusvastefunktiot

Kuvassa 36 näytetään mobiliteettikuvaajat iskukokeelle numero 4 ja mallille 3. Iskukokeen 4 herätevoima oli noin 0.6 kN. Kuvista nähdään ensisilmäyksellä että mitattujen ja mallinnettujen taajuusvastefunktioiden välillä on melko suuria eroja, mutta myös yhtäläisyyksiä.

Ensinnäkin, mobiliteetin suuruusluokka on mittauksen ja mallinnuksen välillä sama. Tämä antaa lisäluotettavuutta mallinnukselle. Mallin tuottamat vastefunktiot ovat selkeimpiä verrattuna mitattuihin. Mallien ominaistajuuksilla ilmenee selkeät huippukohdat, jotka näkyvät lähes kaikissa mittauspisteissä. Yksittäisten mittauspisteiden väliset vastefunktiot ovat myös samankaltaisia. Mitatuissa taajuusfunktioissa nähdään myös melko selkeitä huippukohtia, mutta erot mittauspisteiden vastefunktioiden välillä ovat suuremmat. Mallin kaksi ensimmäistä ominaistajuutta ovat myös kapeampia kuin mitattujen.



Kuva 36: Iskukokeen numero 4 ja mallin numero 3 mobilitteettikuvaajat.

Vasteiden amplitudijakaumat eroavat myös toisistaan. Mobilitteetti näyttäisi yleisesti ottaen olevan mitatuissa ja mallinnetuissa vasteissa pienempi ensimmäisellä kahdella ominaistaaajuudella, kun sitä verrataan korkeamman kertaluvun ominaistaaajuuksiin. Malli ennustaa toisen ominaistaaajuuden mobilitteetin olevan suurempi kuin ensimmäisen. Mittaustulokset taas näyttävät ensimmäisen ominaistaaajuuden mobilitteetin olleen suurempi kuin toisen. Noin 22 Hz:n ominaistaaajuus f_4 näkyy selvästi mitatuissa vasteissa, kun taas mallissa vastaavan ominaistaaajuuden mobilitteettiarvot ovat pienemmät. Eroa nähdään myös rakenteen ominaistaaajuudella $f_5 \approx 29$ Hz ja sitä vastaavalla mallin taajuudella 32,5 Hz. Noin 40 Hz:n ominaistaaajuudet näyttäisivät pitkälti vastaavan toisiaan.

Toisaalta, mitatuissa ja mallinnetuissa vasteissa nähdään selkeästi antureiden sijaintien, mallien analysoitavien solmupisteiden ja herätteen sijainnin vaikutukset mobilitteettiin. Herätepisteiden eri sijainneista johtuen samalle ominaistaaajuudelle f_n saadaan mittauspisteestä riippuen eri arvot mobilitteetille, johtuen niin etäisyyksistä tuotettuun impulssiin kuin välipohjan ominaismuotojen kupu- ja solmukohdistista. Mitatusta taajuusvastefunktiosta nähdään taustavärähtelyn, kiihtyvyyssanturin taustakohinan ja analyysi-ikkunan pituuden vaikutus alle 4 Hz:n taajuuksilla. Mitatuissa taajuusvasteissa mobilitteettiarvot ovat melko suuria, kun taas mallin vasteissa mobilitteetit ovat hyvin pieniä.

Mainittavaa on myös Robotin simuloiman ja todellisten tuotettujen impulssien erot ja niiden vaikutus tulosten vertailuun. Analysoitujen iskukokeiden herätevoi-

mien vaihteluväli oli 0,08 - 1,36 kN, kun taas mallinnuksessa käytettiin 0,5 kN herätevoimaa. Impulseja tuotettiin myös huomattavasti useammassa pisteessä, kun taas mallinnuksessa käytettiin kahta herätepistettä. Myös mallinnuksessa käytetyt herätteet olivat taajuusvasteiltaan tasaisia, kun taas todelliset tuotetut vasteet eivät olleet täysin tasaisia.

6.3 Johtopäätökset

Esitettyjen värähtelymittaustulosten perusteella voidaan todeta, että metron aiheuttamat hetkelliset värähtelyn huippuarvot selvästi alittavat annetut ohjearvot. Värähtelyn taajuussisältö keskittyi selvästi 80-125 Hz:n taajuusalueelle, jolloin mitatun välipohjarakenteen alimmat ominaistajuuudet eivät juurikaan päässeet heräämään. Tämän ansiosta todennäköisyys värähtelyn aiheuttamalle rakenteiden vaurioitumiselle on hyvin pieni. Pitkäaikaisen värähtelyn eli vuosikymmenien aikana esiintyvien metrojen ohiajojen synnyttämän värähtelyn kannalta näyttää myös siltä, että väsymysmekanismin aiheuttama vaurioitumisriski on pieni matalista värähtelytasoista johtuen.

Mitatun betonisen välipohjarakenteen kymmenen alinta ominaistajajuutta pystyttiin selvittämään. Onnistuneita mobiliteettimittauksia tehtiin 24 kappaletta. Mittaukset osoittautuivat haasteellisiksi vallitsevan taustavärähtelyn, mitattavan välipohjan jäykkyyden ja antureiden taustakohinan johdosta. Ohiajavat metrot ja lähellä mittaustilaa sijaitseva vinohissi hankaloittivat impulssilekalla tuotettujen impulssien ajoittamista. Mitatun massiivisen välipohjalaatan ollessa hyvin jäykkä impulssileka ei kyennyt herättämään laattaa riittävästi, jotta alimmat ominaistajajuudet erottuisivat selvästi yleisestä taustavärähtelystä ja käytettyjen kiihtyvyyssantureiden taustakohinasta.

Mitattujen ominaistajuuksien vertailu Robotin laskemille ominaistajuuksille viittaisi siihen, että mallinnusmenetelmä pystyy arvioimaan rakenteiden ominaistajajuudet varsin hyvin. 13:sta tehdystä mallista mallit numero 1, 3, 7 ja 10 ennustavat välipohjarakenteen ominaistajajuudet parhaiten. Etenkin mallit 3 ja 7 vastaavat todellista mittaustilaa hyvin. Taajuusvastefunktioiden vertailu paljasti, että saman suuruusluokan herätevoimilla mitatut ja malleille lasketut mobiliteetit olivat vastaavanlaisia. Nämä tulokset antavat lisäluotettavuutta mallinnusmenetelmälle.

Pilarien mallinnus ei tuottanut odotettuja tuloksia, mikä saattaa johtua niiden mallinnustavasta. Toisaalta, pilarit lisäävät myös mallien monimutkaisuutta, joka saattaisi selittää tulokset. Mallinnuksessa oleellista näyttäisi olevan mallinnettavan tilan todelliset mittasuhteet, kantavien rakenteiden ja niiden muodostamien laatta-alueiden huomioonotto sekä oikeiden materiaalien valinta. Mallinnettujen rakenteiden omapainot ja muut merkittävät staattiset kuormat on myös otettava huomioon.

6.4 Menetelmien soveltuvuus nykyisten ja uusien kohteiden haittojen arviointiin

Värähtelymittaustulosten perusteella voidaan todeta mittausten antavan hyvin tarkan kuvan mitatun välipohjarakenteen värähtelykäyttäytymisestä. Mielenkiintoinen

havainto oli värähtelyn kytkeytymisen merkitys huippuarvoissa, jolloin samoilla etäisyyksillä saatiin hyvinkin erilaisia tuloksia. Värähtelyhaittojen kannalta voidaan melko varmasti todeta, ettei metron aiheuttama värähtely ylitä annettuja ohjeita vastaavissa kallioperäisissä kohteissa, joissa käytetyt rakenteet ovat vastaavaltaisia. Tämä tarkoittaa myös sitä, että värähtelyn aiheuttamat rakenteiden vaurioitumisriskit ovat hyvin pienet. Myös uusien kohteiden suunnittelussa värähtelymitaustuloksia voidaan hyödyntää vastaavasti.

Mobiliteettimittausten ja mallinnuksen tuloksia voidaan hyödyntää etenkin resonanssitarkasteluissa nykyisissä ja uusissa kohteissa. Vastaaville massiivisille välipohjille saman suurusluokan jänneväleillä voidaan ominaistajuuksien olettaa olevan samaa luokkaa. Kallioperäisissä tiloissa tapauksessa ei metron heräte juurikaan herätä massiivisten rakenteiden alimpia ominaistajuuksia. Kuitenkin sellaisissa kohteissa, joissa maaperä on pehmeämpää, välipohjarakenteet ohuempia tai välipohjien jännevälit pidempiä, voi tilanne olla hyvinkin toisenlainen.

Mallinnusohjelmisto näyttää myös ennustavan uskottavasti rakenteiden mobiliteetit eri pisteissä annetulle impulssiherätteelle, jolloin ohjelmiston käyttö värähtelyn arvioinnissa vaikuttaa lupaavalta. Käyttämällä erilaisia herätteitä ohjelmistossa voidaan etäisyys- ja kerrosvaimennusta arvioida rakenteissa tai rakennejärjestelmissä. Käytettyjen mallinnustyökalujen avulla pystytään myös arvioimaan välipohjien alin ominaistajuus kellutettujen lattiarakenteiden suunnittelussa.

7 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää Lauttasaaren metroaseman laituritason länsipäässä sijaitsevan varavoimalaitetilan välipohjarakenteen värähtelyominaisuuksia niin mittauksien kuin mallinnuksen avulla. Yksi työn keskeisistä tavoitteista oli selvittää metron aiheuttaman välipohjan värähtelyn voimakkuutta ja taajuussisältöä, jotta mahdolliset rakenteelliset vaurioriskit pystyttäisiin arvioimaan. Värähtelyn taajuussisällön ollessa yksi oleellisista asioista värähtelyn haitallisuuden ja häiritsevyyden arvioinnissa, nousi tavoitteeksi selvittää, mikäli metrojunan heräte kykenee herättämään mitatun rakenteen alimpia ominaistaajuuksia. Välipohjarakenteen ominaistaaajuudet ja mobiliteetit selvitettiin mittausten sekä mallinnuksen avulla. Tämän vuoksi yksi työn tavoitteista oli tarkastella mittaus- ja mallinnusmenetelmien keskinäistä soveltuvuutta ja mahdollisuuksia rakenteiden värähtelyn vaikutusten arviointiin nykyisissä ja uusissa kohteissa. Työn lisätavoitteina oli myös antaa yleisymmärrystä raideliikenteen synnyttämän ja rakenteiden värähtelyn keskeisistä perusteista ja arviointimenetelmistä.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin värähtelyn perusteita, signaalianalyysiä, rakenteiden värähtelyä, raideliikenteen värähtelyherätteen syntymekanismia, värähtelyn leviämistä rakenteisiin ja rakenteiden vaurioitumismekanismeja. Lisäksi käsiteltiin rakennevaurioriskeihin ja ihmisen kokemaan häiritsevyyteen liittyviä standardeja, tunnuslukuja ja ohjearvoja. Menetelmäkappaleessa tarkasteltiin värähtelyn mittaus-, signaalianalyysi-, mallinnus- ja haittojen arviointimenetelmiä. Kappaleessa tarkasteltiin myös yleisiä raideliikenteen värähtelyn teknisiä torjuntakeinoja lähteen vaimentamiseksi.

Työssä suoritettiin kaksi eri välipohjan mittausta, jotka olivat värähtely- ja impulssivasaramittaukset. Värähtelymittausten tarkoituksena oli selvittää ohiajavien metrojen aiheuttaman värähtelyn huippuarvoja ja taajuussisältöä. Mittaustilan välipohjan värähtely selvitettiin käyttäen 21 kiihtyvyysanturia eri puolilla välipohjalaattaa. Välipohjan impulssivasaramittausten eli mobiliteettimittausten avulla arvioitiin mitatun välipohjarakenteen ominaistaaajuudet sekä mobiliteetit tuotetuille impulssiheränteille 15:ssä mittauspisteessä.

Suurin mitattu nopeusvärähtelyn huippuarvo v_{peak} oli 0,64 mm/s, joka mitattiin mittauspisteessä P1, joka sijaitsi noin 3,4 metrin päässä itään päin liikennöivän metron raiteen keskilinjasta. Suurin mitattu liikepoikkeama d_{peak} oli 17,2 μm mittauspisteessä P12, joka sijaitsi noin 3,9 metrin päässä raiteen keskilinjasta. Terssispektreistä ja spektrogrammeista nähtiin, että metron ohiajojen värähtelyn taajuussisältö keskittyi selkeästi noin 80-125 Hz:n taajuusalueelle. Terssispektreistä nähtiin myös, että terssikaistakohtaiset värähtelyn huippuarvot selkeästi alittavat standardin DIN 4150-3 sekä rakennustapakertoimella F_k skaalatut värähtelyn ohjearvot. Tulosten valossa voidaan todeta metron aiheuttaman värähtelyn olevan pientä ja siihen liittyvän rakenteiden vaurioitumisriskin myös olevan pientä.

Mobiliteettimittauksista laskettujen taajuusvastefunktioiden perusteella välipohjarakenteen kymmenen alimman ominaistaaajuuden arvioitiin olevan taajuusalueilla: $f_0 = 5,5\text{-}6,5$, $f_1 = 9,5\text{-}10$, $f_2 = 14\text{-}15$, $f_3 = 18,5\text{-}19,25$, $f_4 = 21,5\text{-}22$, $f_5 = 28,5\text{-}29$, $f_6 = 36\text{-}36,5$, $f_7 = 40,25\text{-}40,5$, $f_8 = 42\text{-}42,5$ ja $f_9 = 46,5\text{-}46,75$ Hz.

Työn mallinnukset suoritettiin käyttäen Autodesk Robot-mallinnusohjelmistoa. Mitataustilasta tehtiin yhteensä 13 mallia, jotta välipohjan dimensioiden ja sitä tukevien rakenteiden vaikutusta pystyttäisiin arvioimaan. Malleille laskettiin ominaistaaajuuksien lisäksi taajuusvastefunktiot, joita vertailtiin mitattuihin vastefunktioihin. Taajuusvastefunktioiden avulla pystyttiin edelleen arvioimaan mallinnusohjelman ennustamaa rakenteiden värähtelykäyttäytymistä.

Malleista etenkin neljän (mallit 1, 3, 7 ja 10) todettiin tuottavan suotuisia tuloksia ja vastaavan mitattuja ominaistaaajuuksia parhaiten. Näiden mallien ennustama alin ominaistaaajuus f_0 oli taajuusalueella 5,65-6,91 Hz. Mainittavaa on, että mallit eivät pystyneet ennustamaan kolmatta ominaistaaajuutta f_2 . Mitattujen ja mallinnettujen ominaistaaajuuksien vertailu paljasti pienimmän poikkeaman olevan 0,01 Hz ominaistaaajuudelle f_3 (mallit 1 ja 7). Suurin poikkeama oli 4,36 Hz ominaistaaajuudelle f_5 (malli 9), jos ominaistaaajuutta f_2 jota mallit eivät pystyneet ennustamaan, ei huomioida vertailussa. Taajuusvastefunktioiden tulosten vertailu paljasti, että saman suuruusluokan herätevoimilla mitatut ja malleille lasketut mobiliteetit olivat vastaavanlaisia. Nämä tulokset antavat lisäluotettavuutta mallinnusmenetelmälle.

Tulosten perusteella käytetyt menetelmät soveltuvat hyvin nykyisten ja uusien kohteiden värähtelyhaittojen arvioinnissa. Värähtelymittaukset antavat hyvin tarakan kuvan mitatun välipohjarakenteen värähtelykäyttäytymisestä. Mittaustuloksia voidaan hyödyntää nykyisissä ja uusissa vastaavissa kohteissa. Mobiliteettimittausten ja mallinnuksen tuloksia voidaan hyödyntää resonanssitarkasteluissa nykyisissä ja uusissa kohteissa. Vastaaville massiivisille välipohjille saman suuruusluokan jänneväleillä voidaan ominaistaaajuuksien olettaa olevan samaa luokkaa. Autodesk Robot ennustaa rakenteiden mobiliteetit eri pisteissä annetulle impulssiherätteelle uskotavasti, joten ohjelmiston käyttö värähtelyn arvioinnissa vaikuttaa lupaavalta.

Tulosten tarkastelussa ja tulokinnassa on muistettava mittauksiin ja mallinnukseen liittyvien epävarmuustekijöiden arviointi. Värähtelymittausten tapauksessa voidaan pohtia, jos mitattujen metrojen ohiajojen määrä on riittävä antaakseen täysin todellisen arvion värähtelyn huippuarvoista. Mobiliteettimittauksissa vallitseva taustavärähtely ja käytettyjen antureiden taustakohina on voinut vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, mikä selittäisi miksi ominaistaaajuuksille ei löydetty absoluuttisia arvoja. Pohdittavaa on myös, mitattiinko pelkän välipohjan tai monen rakenteen muodostaman järjestelmän vasteita.

Mallinnuksen kannalta tulee pohtia mallien ja todellisen tilan rakenteiden vastaavanlaisuutta. Otettiinkö mallinnuksessa kaikki oleelliset kantavat rakenteet huomioon ja olivatko käytetyt välipohjan tuentatavat todellisuutta vastaavia? Myös pilareiden mallinnustapa on voinut olla vääränlainen, joka selittäisi pilarimallien tulokset. Nämä seikat voivat selittää miksi välipohjan toisiksi alinta ominaistaaajuutta ei pystytty ennustamaan. Vaihtoehtoisesti voi myös olla, että toisiksi alin arvioitu ominaistaaajuus ei olekaan välipohjan ominaistaaajuus.

Jatkotutkimuksen kannalta huomioonotettavia seikkoja mallinnuksessa on monia. Jotta raideliikenteen värähtelyä voisi laajemmin arvioida suunnittelutehtävissä käytetyn mallinnusohjelman avulla, tulisi mallien olla useamman rakenteen järjestelmiä tai kokonaisrakennuksia. Tässä työssä maanalaiset huoltotilat ja niiden rakenteet olivat hyvin monimutkaisia, joka rajoitti kyseistä asiaa.

Kallio- ja maaperän ja maanpinta tulisi myös ottaa huomioon, jotta raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn leviäminen rakenteisiin niin maan alla kuin päälläkin olisi todenmukaista. Raideliikenteen värähtelyherätteen kannalta on sopivan junan ja raitteiden herätemallin käyttö ja tutkiminen tärkeää, jotta todellisuutta vastaavat mallinnusparametrit voitaisiin antaa malleille. Työn suhteellisen rajoitetun ajan ja aihepiirin vuoksi kyseisiä asioita ei tutkittu, sillä ne lisäävät mallinnukseen monta monimutkaista osatekijää, joiden huomioonotto laajentaa merkittävästi työn laajuutta. Mainittujen asioiden selvittäminen vaatii mm. useita laajoja mittauksia. Käytetty mallinnusohjelma saattaa myös rajoittaa kyseisten asioiden huomioonottoa.

Viitteet

- [1] Eitzenberg, A. Train-induced Vibrations - A review. Technical Report. Luleå University of Technology, Division of Mining and Geotechnical Engineering. 2008.
- [2] Levomäki, M. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. *Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 3/1999*. Helsinki: Ratahallintokeskus. 1999. 37 s. + 5 s.
- [3] Peltonen, T. Vibration Measurements. Luentomateriaalit. Akukon Oy. 2018.
- [4] Rindel, J. H. *Sound Insulation in Buildings*. Boca Raton: CRC Press. 2017. 450 s.
- [5] Benaroya, H., Nagurka, M. & Han, S. *Mechanical Vibration: Analysis, Uncertainties, and Control*. 4. painos. Boca Raton: CRC Press. 2017. 579 s.
- [6] Bachmann, H. et al. *Vibration problems in structures. Practical guidelines*. Basel: Boston, Birkhäuser Verlag cop. 1995. 234 s.
- [7] Crocker, M. J. *Handbook of Noise and Vibration*. Hoboken, N.J. : Wiley. 2007. 1569 s.
- [8] Papageorgiou A. V. Equivalent modal damping ratios for concrete/steel mixed structures. *Computers & structures*. Vol. 88:19-29. 2010. s. 1124-1136.
- [9] Jeleč, M., Varevac D. & Rajvčić V. Cross-laminated timber (CLT) - a state of the art report. *Gradevinar*. Vol. 70:2. 2018. s. 79-95.
- [10] Talja, A. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT tiedotteita 2278. 2004.
- [11] Connolly, D. P., Kouroussis, G., Lagrouch, O., Ho, C. L. & Forde, M. C. Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*. Vol. 92. 2015. s. 64-81.
- [12] DIN 4150-3:1993. Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures. Deutsches Institut für Normung. 1993.
- [13] ISO 14837-1:2005. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General guidance. Geneva: International Organization for Standardization. 2005.
- [14] ISO 1683:2015. Acoustics - Preferred reference values for acoustical and vibratory levels. Geneva: International Organization for Standardization. 2015.
- [15] Talja, A. & Saarinen, A. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. VTT tiedotteita 2468. 2009.

- [16] Rimell A. N., Mansfield N. J. & Paddan G. S. Design of digital filters for frequency weightings (A and C) required for risk assessments of workers exposed to noise. *Industrial Health 2015*, Vol 53. 2015. s. 21-27.
- [17] IEC 61672-1:2002. Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications. International Electrotechnical Commission. 2002.
- [18] Lahti, T. Akustinen mittaustekniikka. Luentomateriaali Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto: S-89.130 - Akustinen mittaustekniikka. 1995. 151 s.
- [19] ISO 2631-1:1997. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. Geneva: International Organization for Standardization. 1997.
- [20] ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). Geneva: International Organization for Standardization. 2003.
- [21] Zwicker, E. Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 31:2. 1961. s. 248.
- [22] Moore, B. C. J. & Glasberg, B. R. Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 74:3. 1983. s. 750-753.
- [23] IEC 61260:1995. Electroacoustics - Octave-band and Fractional-octave-band Filters. International Electrotechnical Commission. 1995.
- [24] Pitkäranta, J. *Calculus Fennicus: TKK:n 1. lukuvuoden laaja matematiikka (2000-2013)*. Teknillinen korkeakoulu, Helsinki. Avoimet oppimateriaalit. 2015. 1020 s.
- [25] Døssing, O. *Structural Testing - Part 1: Mechanical Mobility Measurements*. Brüel & Kjær. Tanska: Nærum. 1988. 47 s.
- [26] Anam, I. & Shoma, Z. N. Nonlinear Properties of Reinforced Concrete Structures. Konferenssipaperi. 2nd Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics. 2002.
- [27] Haiko, J. Kalliorakentamisen aiheuttamat värähtelyt ja värähtelyt häiriötekijänä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. 2010. 77 s.
- [28] Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P. & Moritz, L. Geodynamik i praktiken. Linköping: Statens Geotekniska Institut. 2000. 51 s.

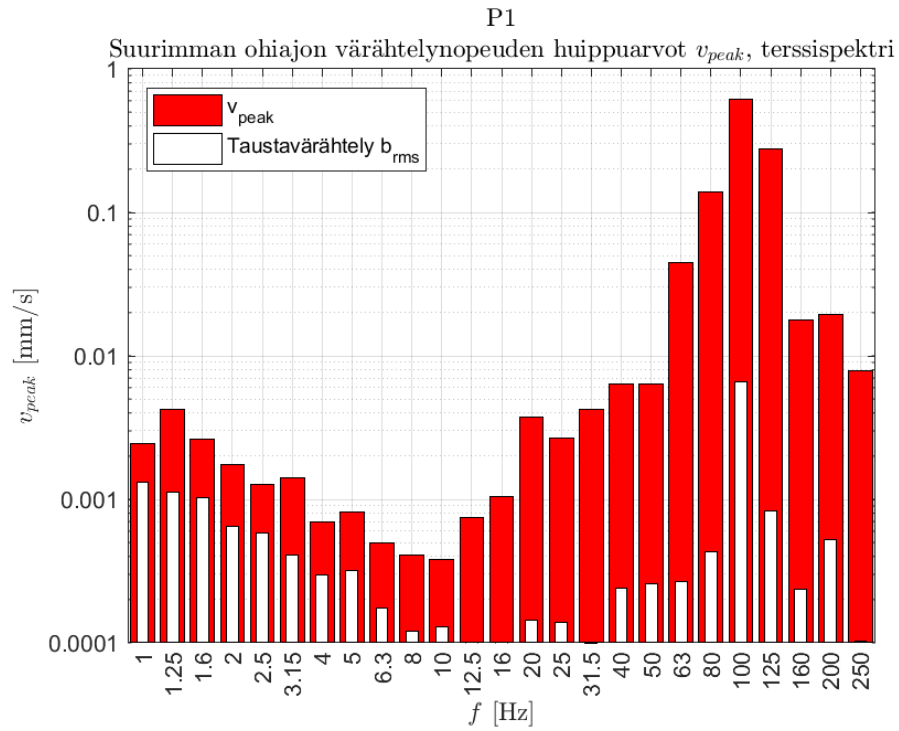
- [29] Ungar, E. E. & Bender E. K. Vibrations produced in building by passage of subway trains; parameter estimation for preliminary design. *Proceeding of the 4th International Conferences on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 75)*. Sendai, Japani. 1975.
- [30] Törnqvist, J. & Talja A. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working papers 50. 2006.
- [31] Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen M. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. VTT tiedotteita 2425. 2008.
- [32] Remington, P. J., Kurzweil, L. G. & Towers, D. A. Low Frequency Noise and Vibrations from Trains. In: *Transportation Noise Reference Book*. Ed. by Nelson. P. M. London: Butterworths. 1987. 520 s.
- [33] Kurzweil, L. G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 66:3. 1979. s 363–370.
- [34] RIL 253-2010. *Rakentamisen aiheuttamat tärinät*. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. 2010. 122 s.
- [35] Leventhall, H. G. Low-frequency traffic noise and vibrations. In: *Transportation noise reference book*. Ed. by Nelson. P. M. London: Butterworths. 1987. 520 s.
- [36] Talja, A. & Törnqvist, J. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. VTT:n Tutkimusraportti VTT-R-04703-14. 2014.
- [37] Talja, A., Toratti T. & Järvinen. E. Lattioiden värähtelyt Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT tiedotteita 2124. 2002.
- [38] Ylinen, A. *Kimmo- ja Lujuusoppi* 1. 2. painos. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö. 1965.
- [39] Feldmann, M. et al. Design of floor structures for human induced vibrations. EUR 24084 EN. Joint Research Centre - European Comissin. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2009. 64 s.
- [40] Dobrin, M. B. & Savit, C. H. *Introduction to Geophysical prospecting*. 4. painos. McGraw-Hill College. 1988. s. 867.
- [41] Yang, Y. B. & Hong, X. *Wave Propagation for Train-Induced Vibrations: A Finite/Infinite Element Approach*. World Scientific. 2009. 492 s.
- [42] Sutela, P. Junan nopeuden vaikutus rautatieliikenteen aiheuttamaan tärinään. Diplomityö. Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta. 2016. 82 s. + 5 liitettä.
- [43] Scossa-Romano, E. & Oertli, J. Rail Dampers, Acoustic Rail Grinding, Low Height Boise Barriers: A report on the state of the art. Bern: Schweizerische Bundesbahnen SBB. 2012. 38 s.

- [44] Lakušić, S. & Maja, A. Rail Traffic Noise and Vibration Mitigation Measures in Urban Areas. *Tehnički vjesnik*. Vol 19:2. 2012. s. 427-435.
- [45] Broch J. T. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. 2. painos. Brüel & Kjær. 1980.
- [46] Tinga, T. *Principles of Loads and Failure Mechanisms: Applications in Maintenance, Reliability and Design*. Springer-Verlag London. 2013. 302 s.
- [47] Schijve, J. *Fatigue of Structures and Materials*, 2. painos. Springer Netherlands. 2009. 623 s.
- [48] BS 7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. British Standards Institution. 1993.
- [49] Bachmann, H. *Vibrations in Structures: Induced by Man and Machines*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering. 1987. 176 s.
- [50] Banverket. Buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik - Riktlinjer och tillämpningar. Stockholm: Banverket och Naturvårdsverket (Dnr. S02-4235/SA60). 1997. 82 s.
- [51] Bodén, H., Carlsson, U., Glav, R., Wallin, H. P. & Åbom, M. *Ljud och vibrationer*. 2. painos. Stockholm: Nordstedt. 2001.
- [52] NS 8176:1999. Vibrasjoner og støt. Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker. Oslo: Norges Standardiseringsforbund. 1999.
- [53] DIN 4150-2:1999. Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings. Deutsches Institut für Normung. 1999.
- [54] High-Speed ground transportation noise and vibration impact assessment. *Report No. 293630-1*. Washington: Federal Railroad Administration. 1998. 180 s. + 40 s.
- [55] Hemsworth, B. Reducing Groundborne Vibrations: State-of-the-Art Study, *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 231(3). 2003. s. 703-709.
- [56] Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. 2018.
- [57] Backholm, M. Savion rautatietunnelin ympäristötärinä ja -melu. Vibkon Tekninen muistio TM 1956-4. 2003. 4 s.
- [58] Akukon Oy. Länsimetro - Runkomelun suositusarvot. 17.6.2011. Raportti 093078-25. 2011.

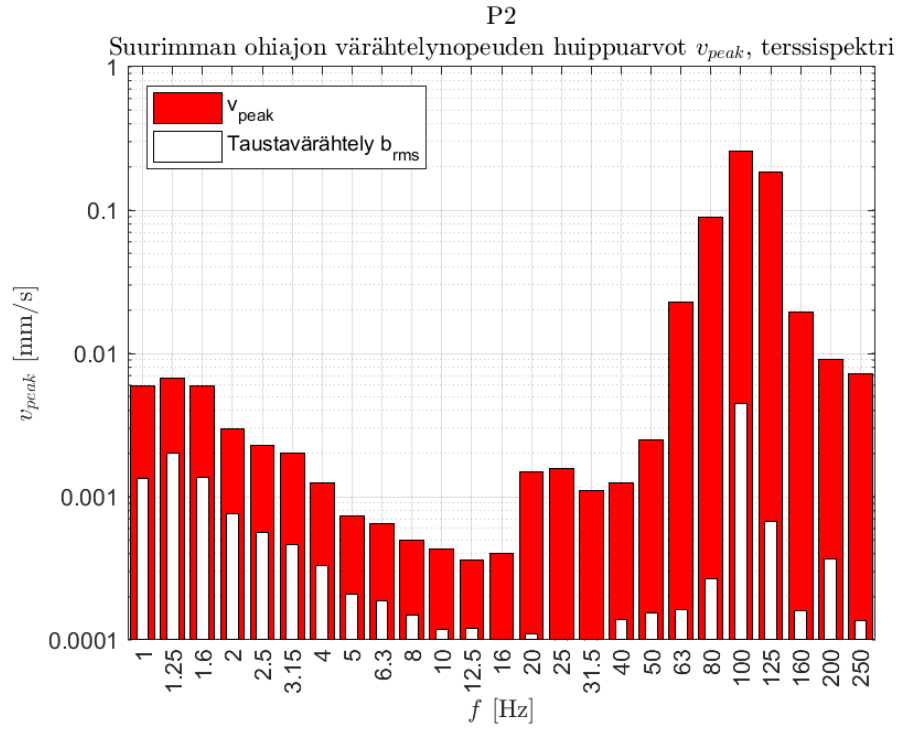
- [59] ISO 7626-2:2015. Mechanical vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility - Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter. Geneva: International Organization for Standardization. 2015.
- [60] Melke, J. Noise and vibration from underground railway lines: Proposal for a prediction procedure. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 120:2. 1988. s. 391–406.
- [61] Peltonen, T. & Backholm, M. Raideliikenteen runkomelun mallintaminen ja arviointi. Konferenssipaperi. Akustiikkapäivät 2009, Vaasa. 2009. 8 s.
- [62] Autodesk. Modal Analysis Assumptions. <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/documentation/RSA/2013/ENU/filesROBOT/GUID-3400C9A4-F47F-4A7F-9B67-66BEE7B9105A-htm.html>. Viitattu: 20.12.2018.
- [63] Kauppinen, M. Ratakiskon elinkaari. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. Helsinki: Liikennevirasto. 2011. 113 s.
- [64] Heutschi K., Bühlmann, E. & Oertli, J. Options for reducing noise from roads and railway lines. *Transportation Research Part A* 94. 2016. s. 308-322.
- [65] Vincent, N. Rolling Noise Control at Source: State-of-the-Art Survey. *Journal of Sound and Vibration*, Vol: 231:3. 2000. s. 865-876.
- [66] Lawrence, B. Effect of Rail Grinding On Rail Vibration & Groundborne Noise: Results From Controlled Measurements. *Proceedings of ACOUSTICS 2004*. Gold Coast, Australia. 2004. s. 105-110.
- [67] Getzner Werkstoffe GmbH. <https://www.getzner.com/en/applications/railway>. Viitattu: 9.12.2018.
- [68] Rantatalo M. & Xin T. Review of countermeasure and regulations for railway induced ground vibrations in tunnels. Luleå University of Technology & Luleå Railway Research Center. 2013. 23 s.
- [69] Akukon Oy. Länsimetro - Runkomelueristysmateriaaleille asetettavat vaatimukset. 16.2.2011. Raportti 093078-28. 2011.
- [70] Pöyry Finland Oy. Länsimetro AR 204_001 1L17-18. Ratatunnelin leikkausprofiili. 15.5.2015.
- [71] Länsimetron suunnittelukäsikirja. Länsimetro Oy. Versio 1.11, 3.6.2015.

A Mittaustulokset

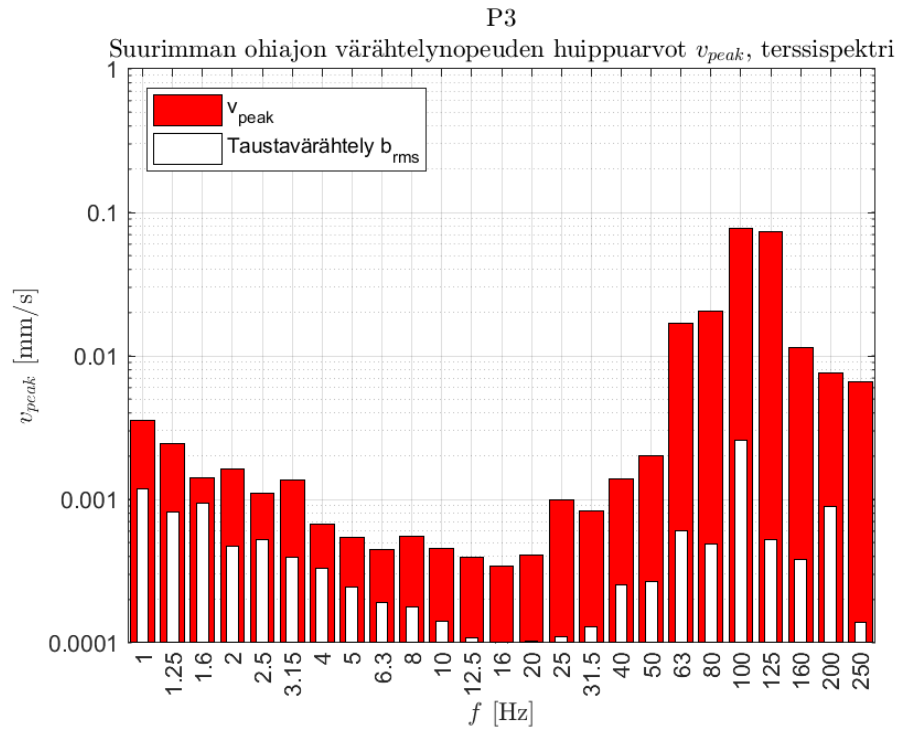
A.1 Nopeusvärähtelyn huippuarvot



Kuva A1: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P1.



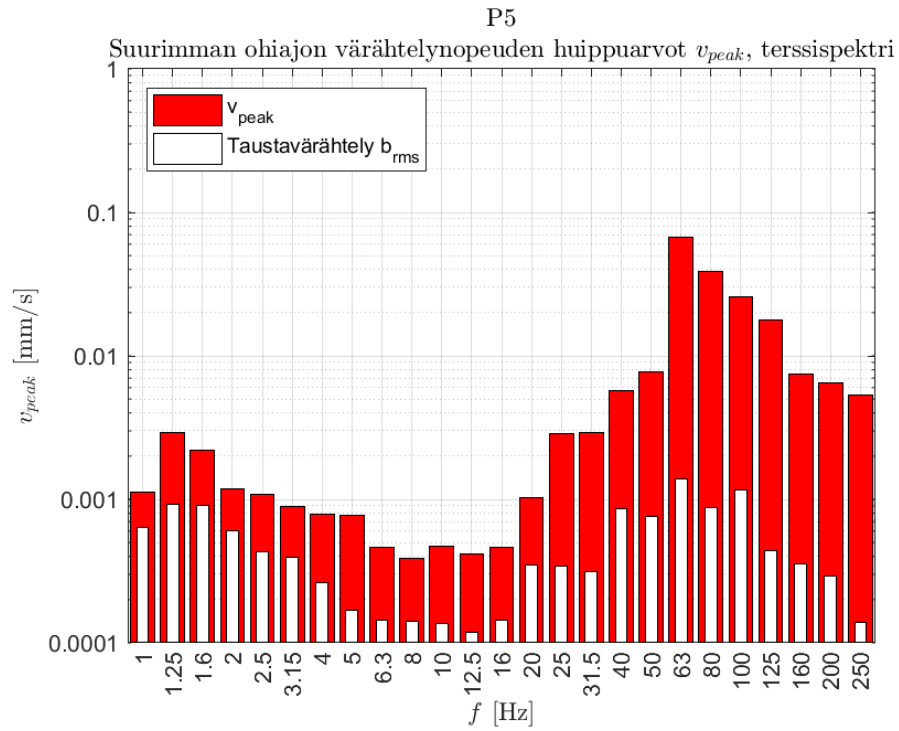
Kuva A2: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P2.



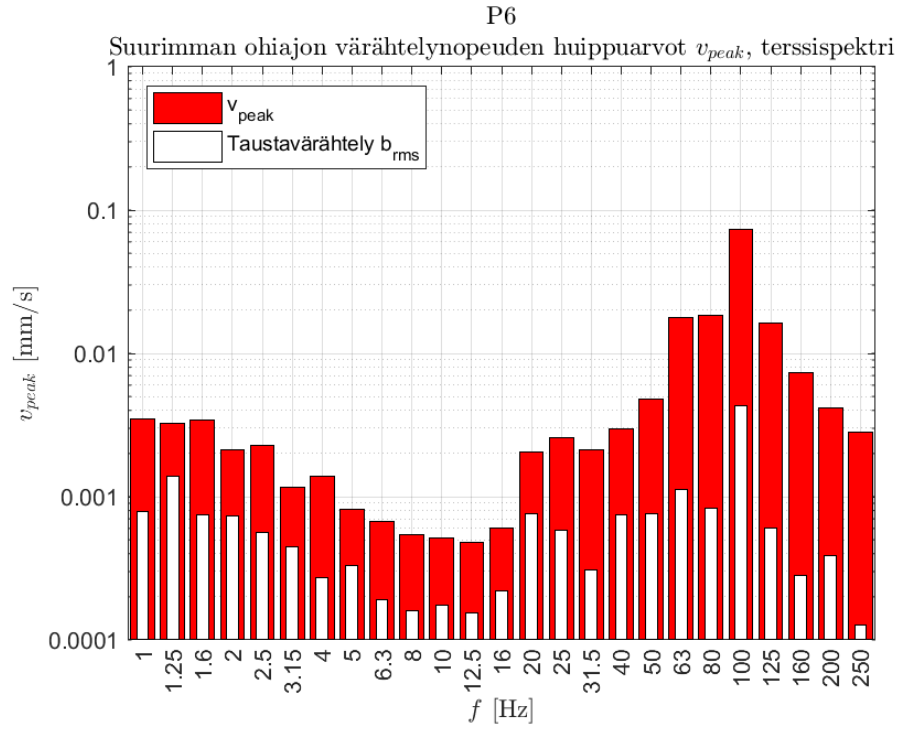
Kuva A3: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P3.



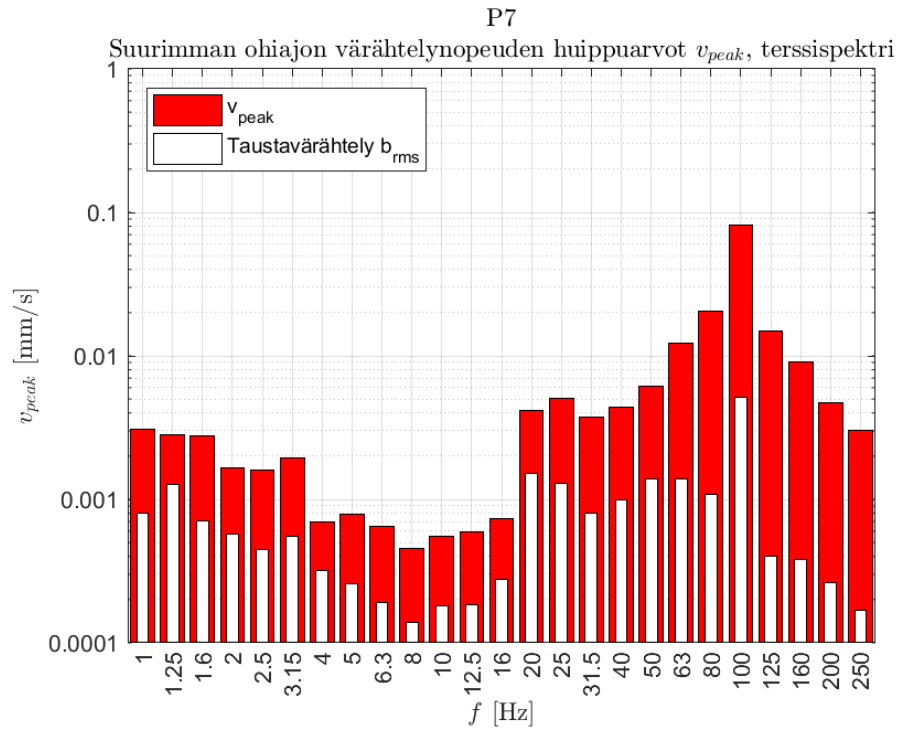
Kuva A4: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P4.



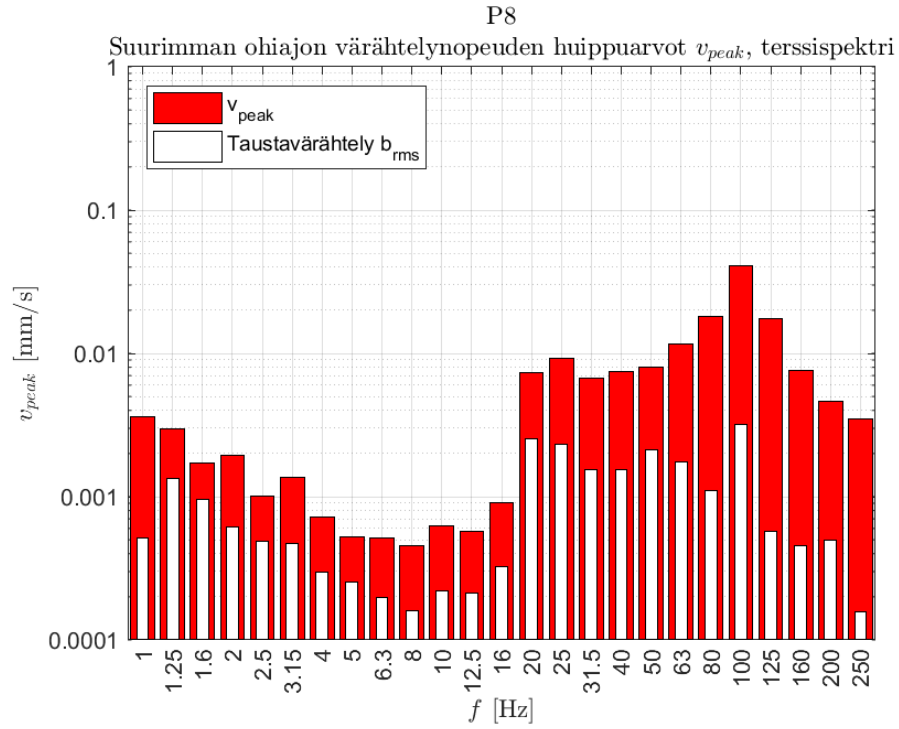
Kuva A5: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P5.



Kuva A6: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P6.



Kuva A7: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P7.



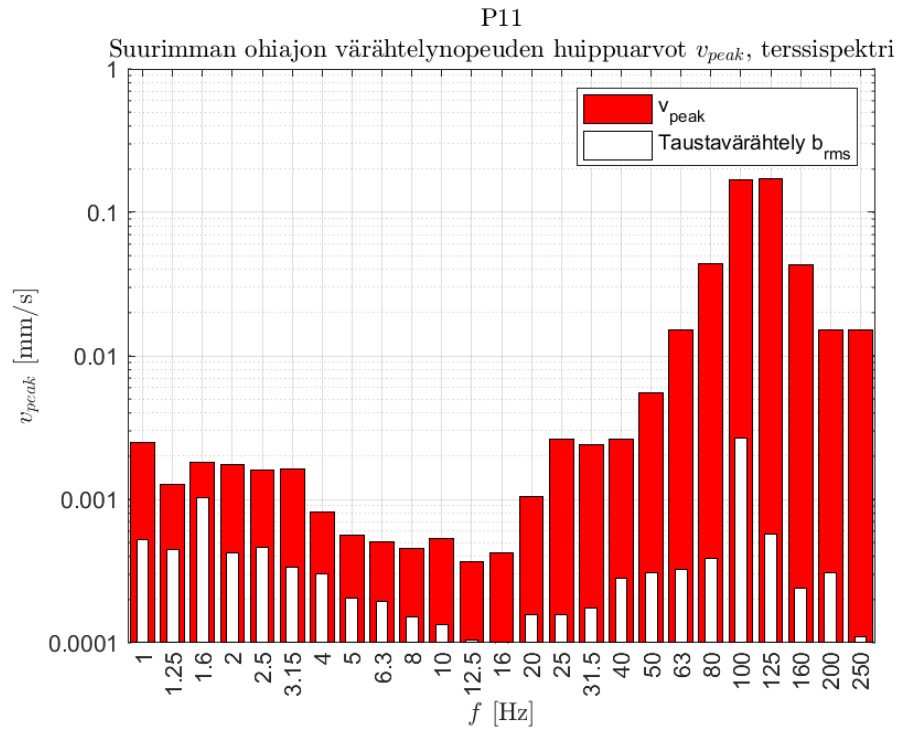
Kuva A8: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P8.



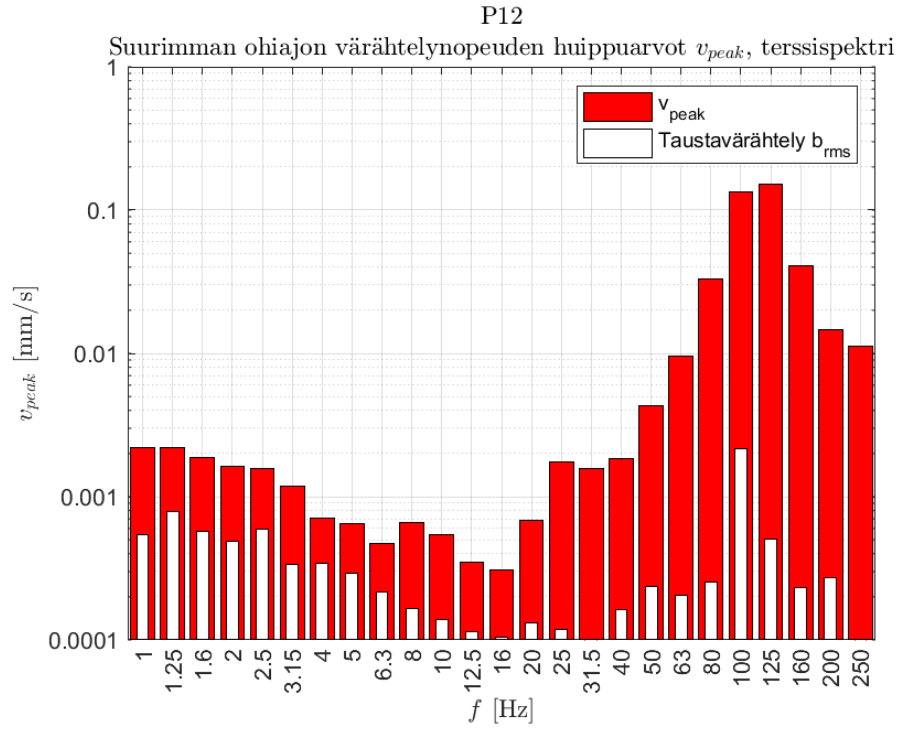
Kuva A9: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P9.



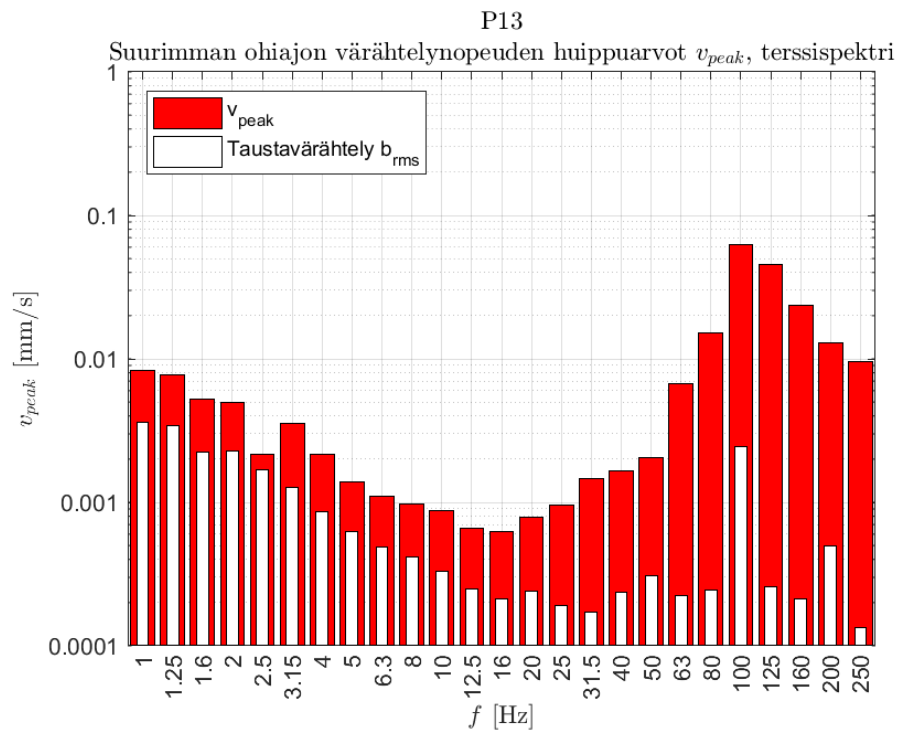
Kuva A10: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P10.



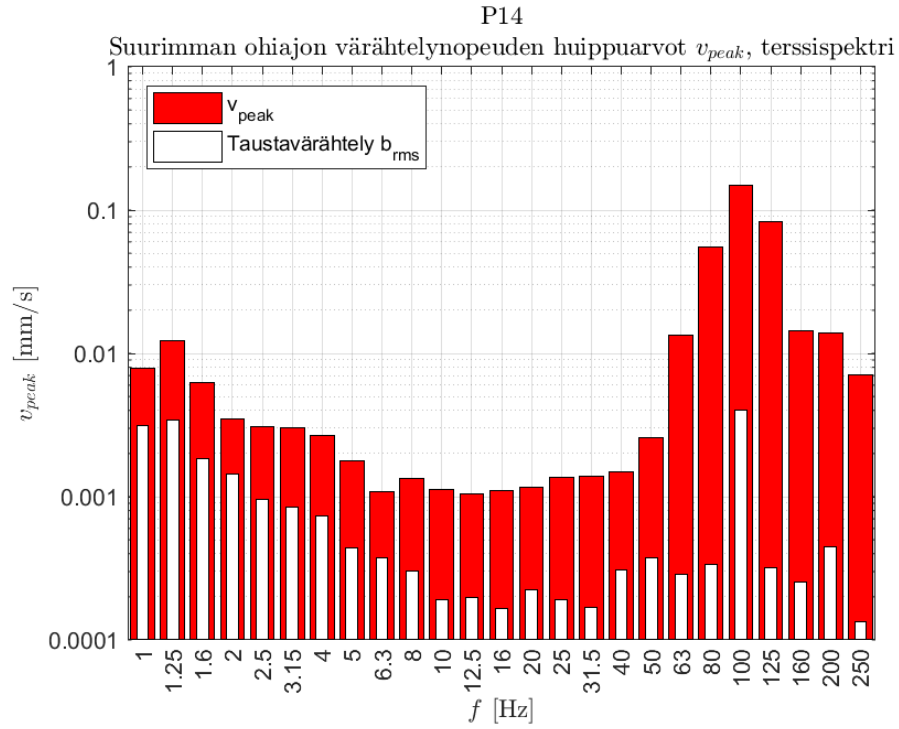
Kuva A11: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P11.



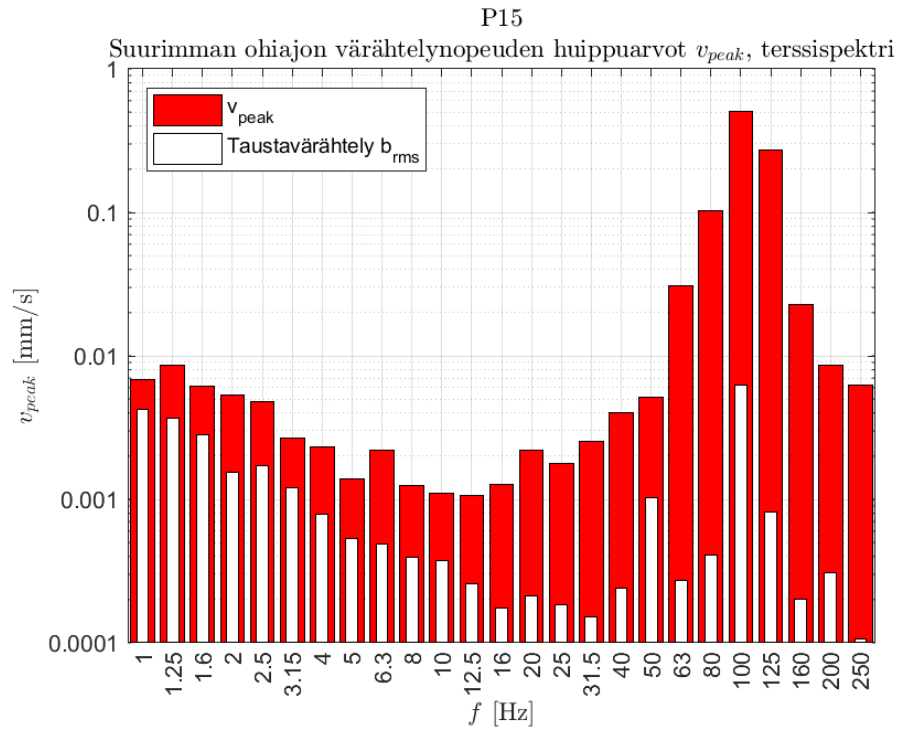
Kuva A12: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P12.



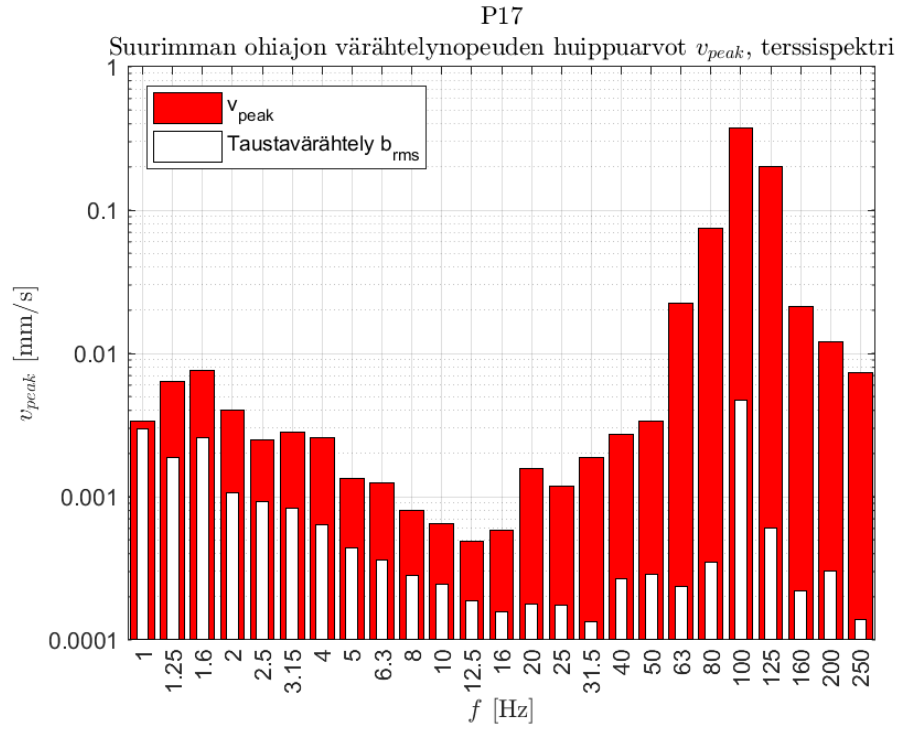
Kuva A13: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P13.



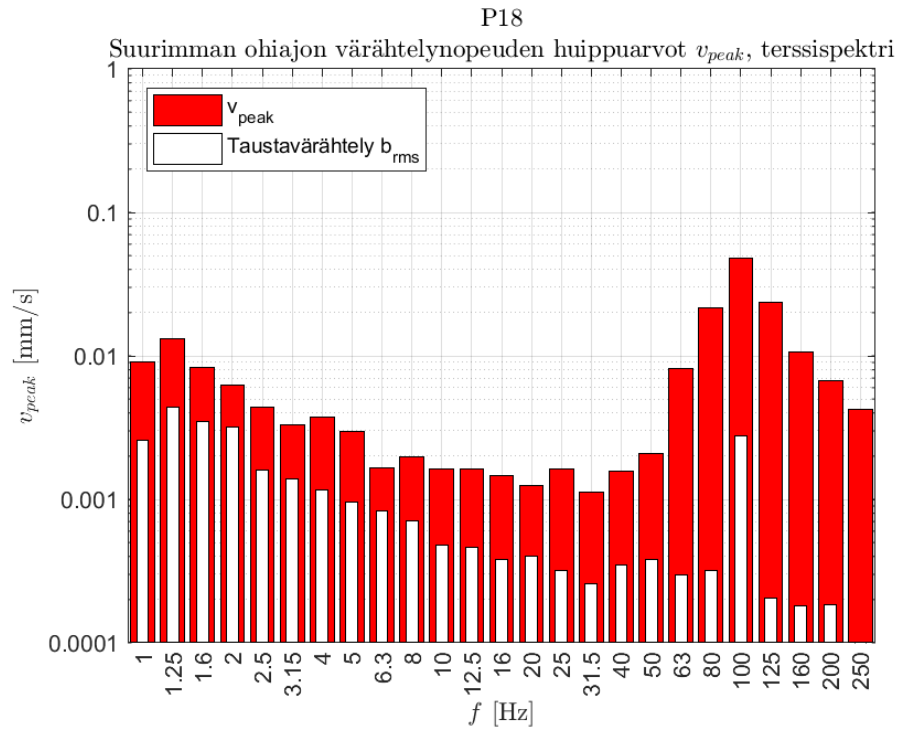
Kuva A14: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P14.



Kuva A15: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P15.



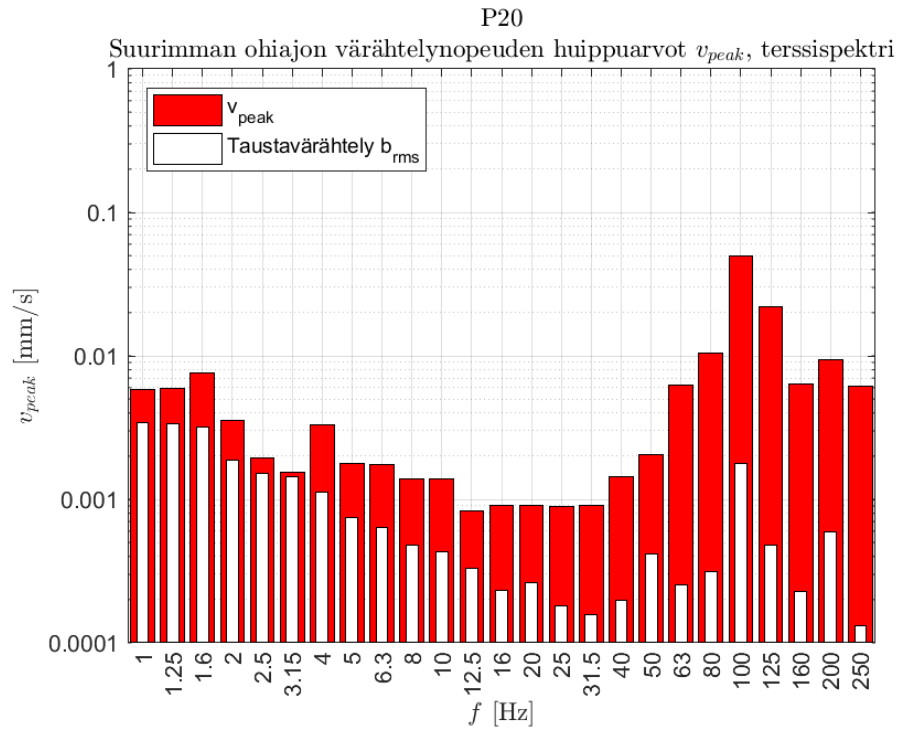
Kuva A16: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P17.



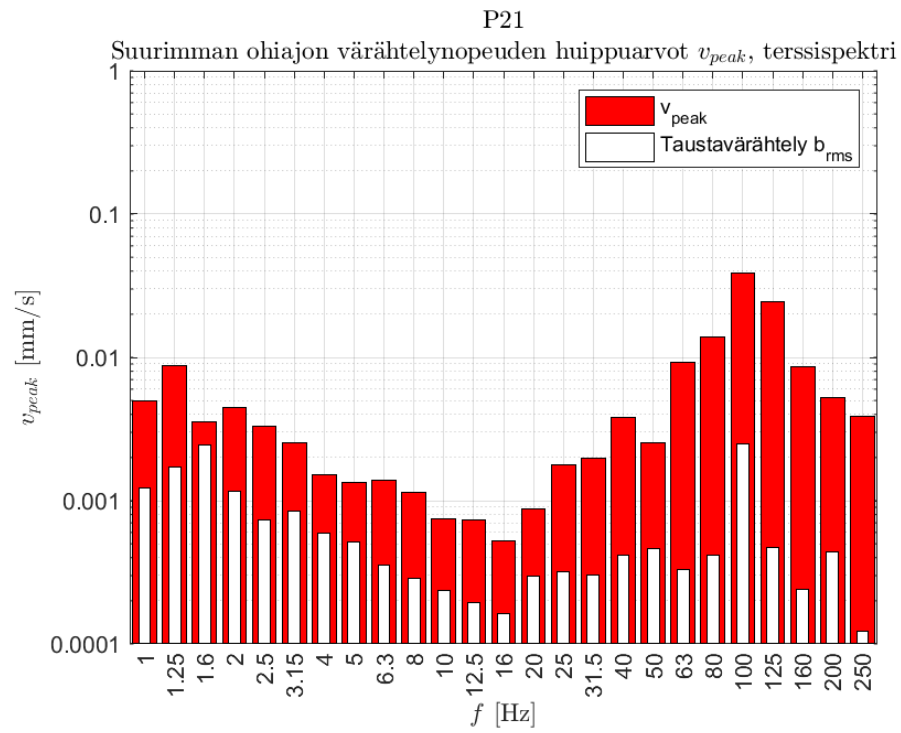
Kuva A17: Mitatut värähtelyn nopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P18.



Kuva A18: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P19.

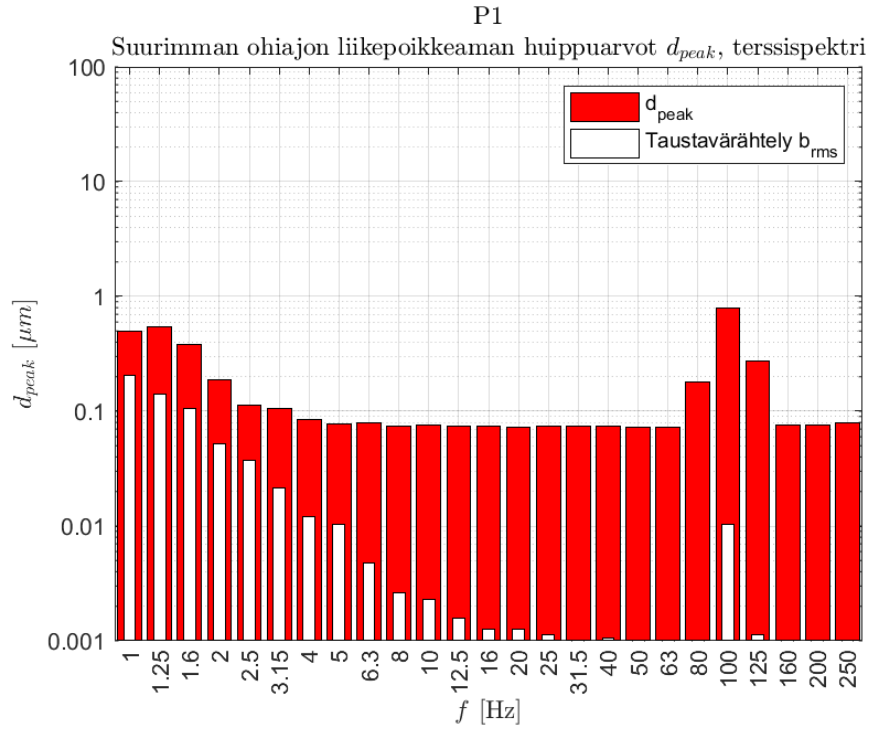


Kuva A19: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P20.

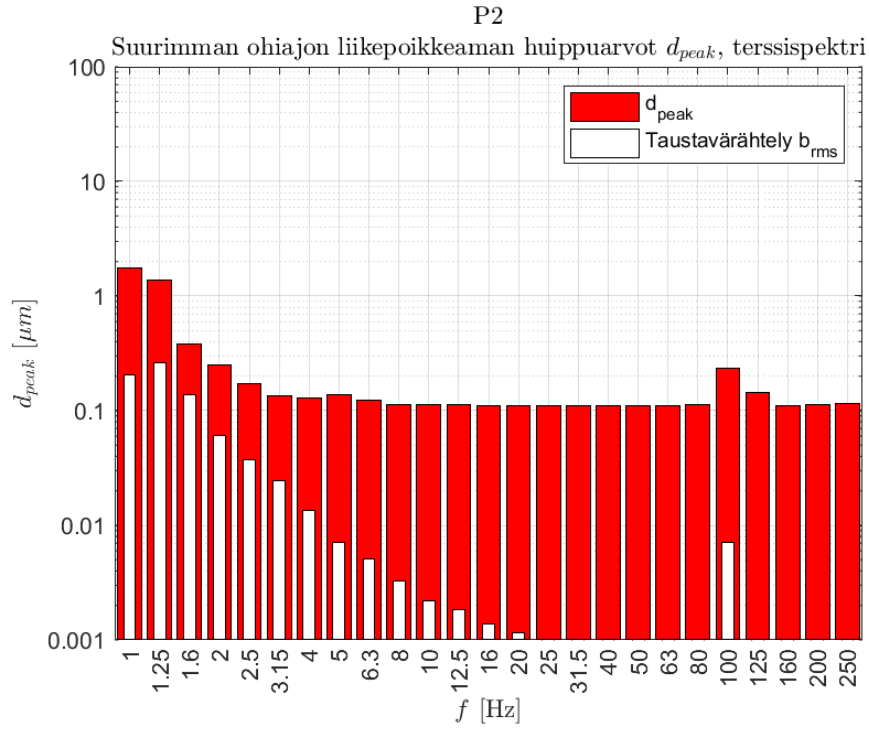


Kuva A20: Mitatut värähtelynopeuden huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P21.

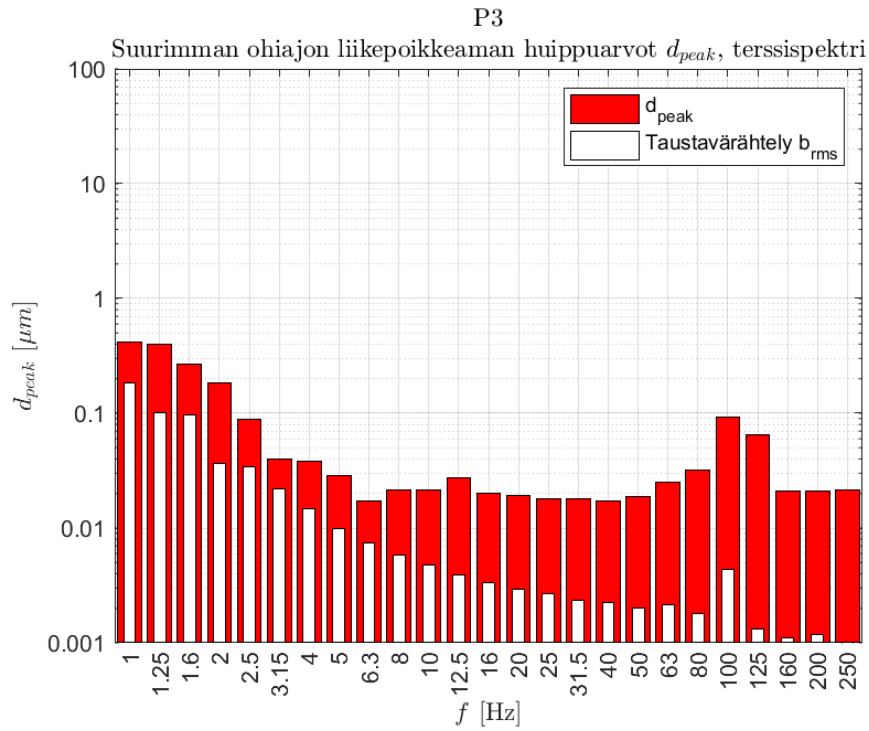
A.2 Liikepoikkeaman huippuarvot



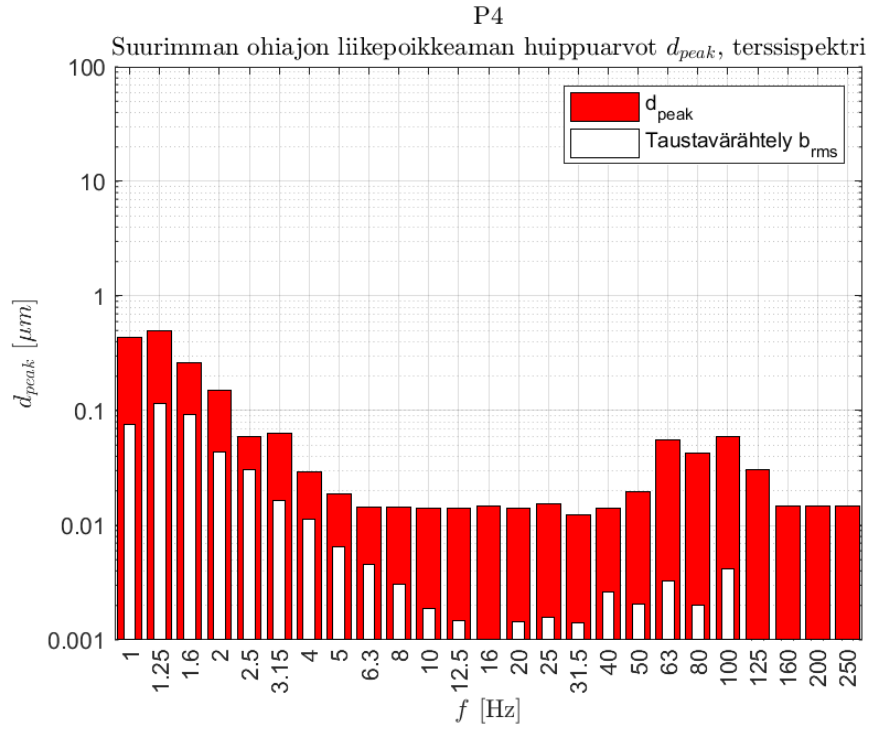
Kuva A21: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P1.



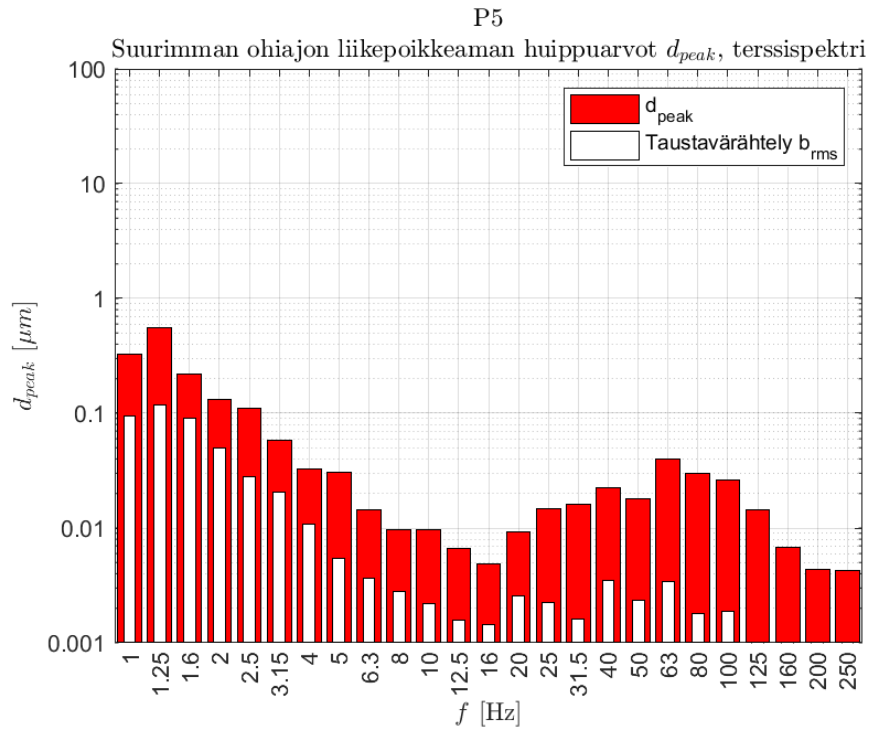
Kuva A22: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P2.



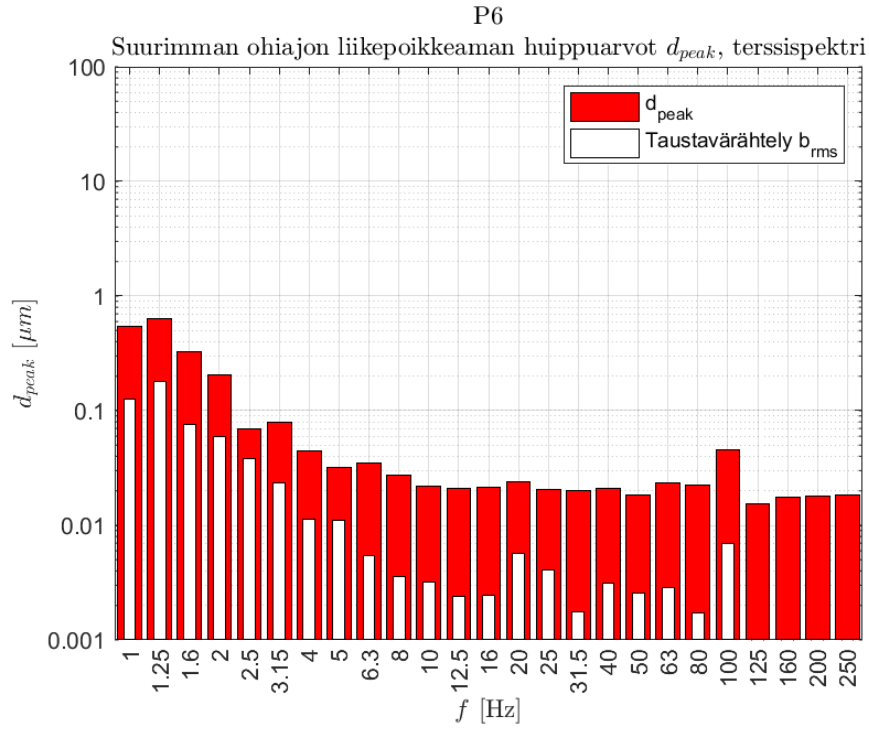
Kuva A23: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P3.



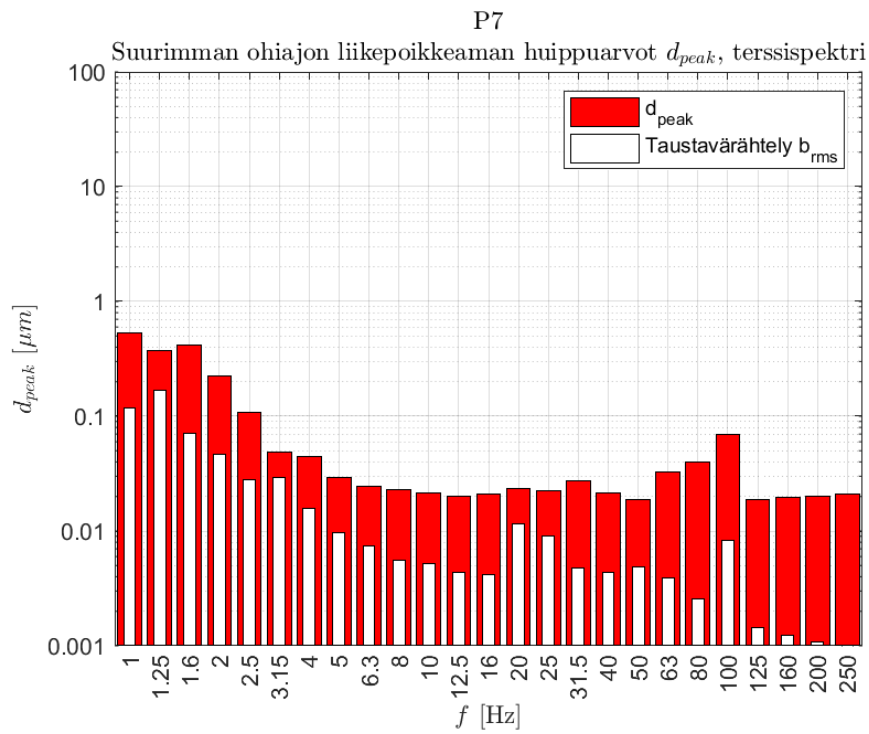
Kuva A24: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P4.



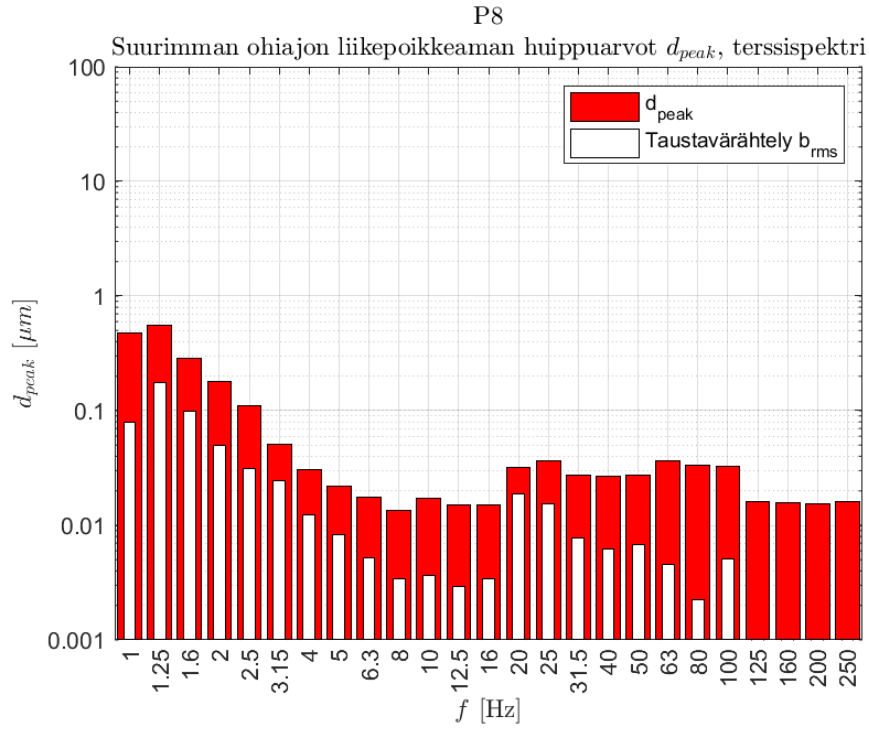
Kuva A25: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P5.



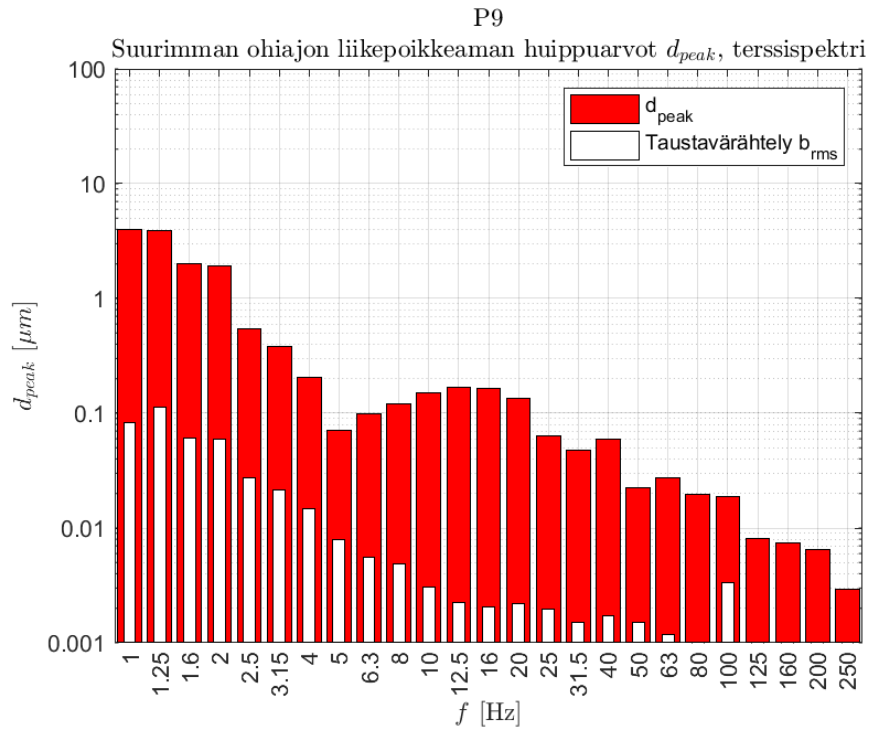
Kuva A26: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P6.



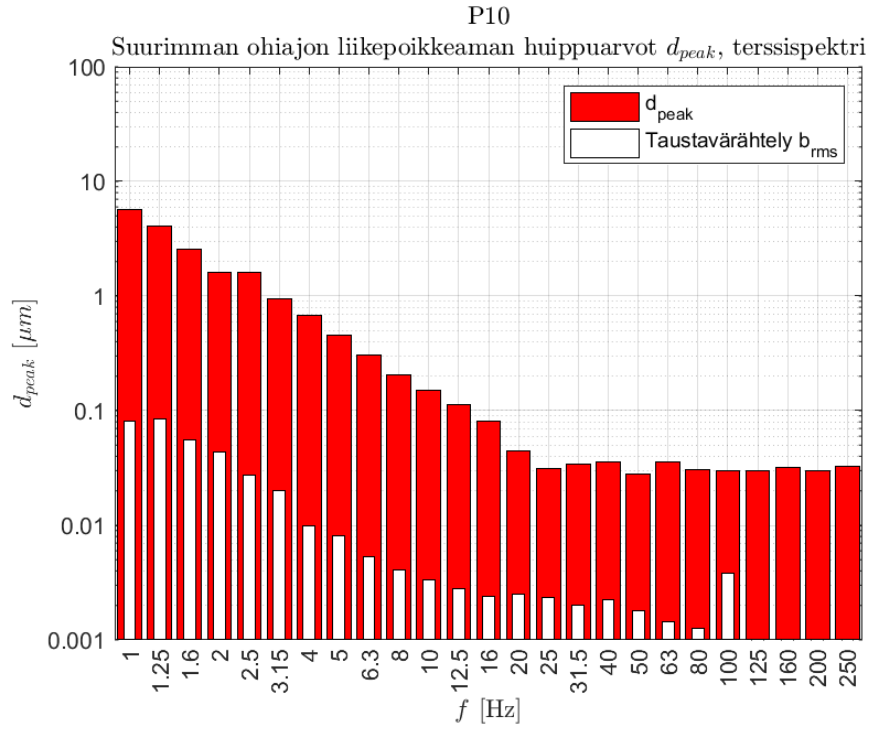
Kuva A27: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P7.



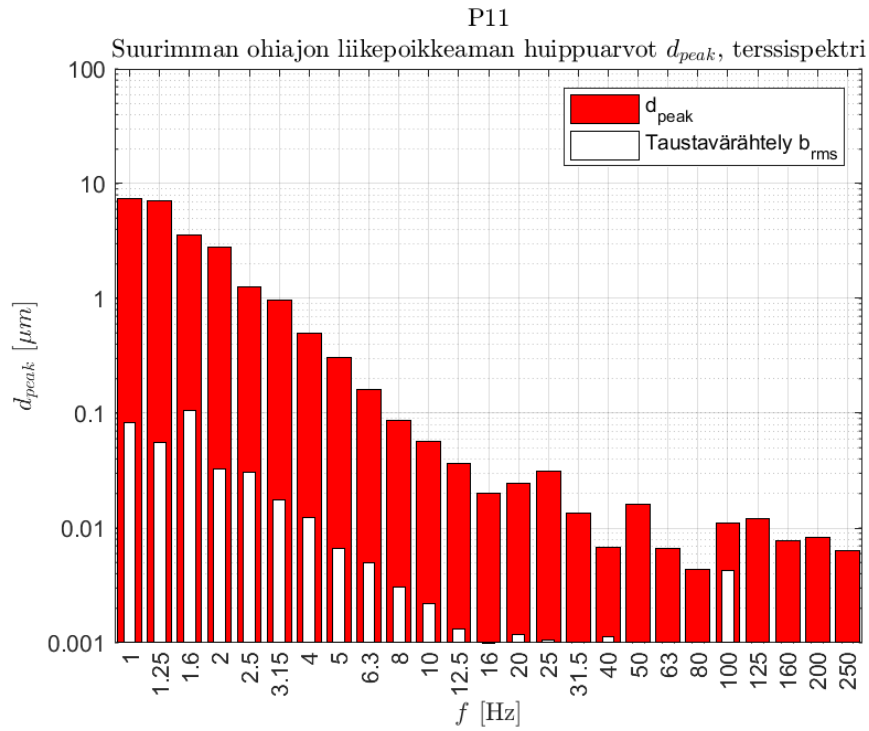
Kuva A28: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P8.



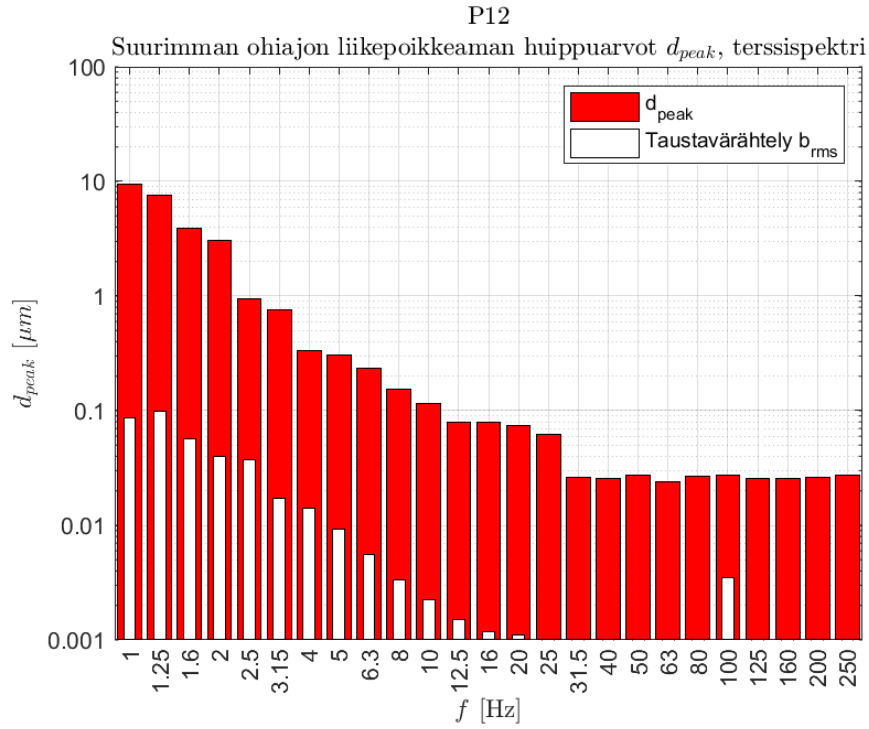
Kuva A29: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P9.



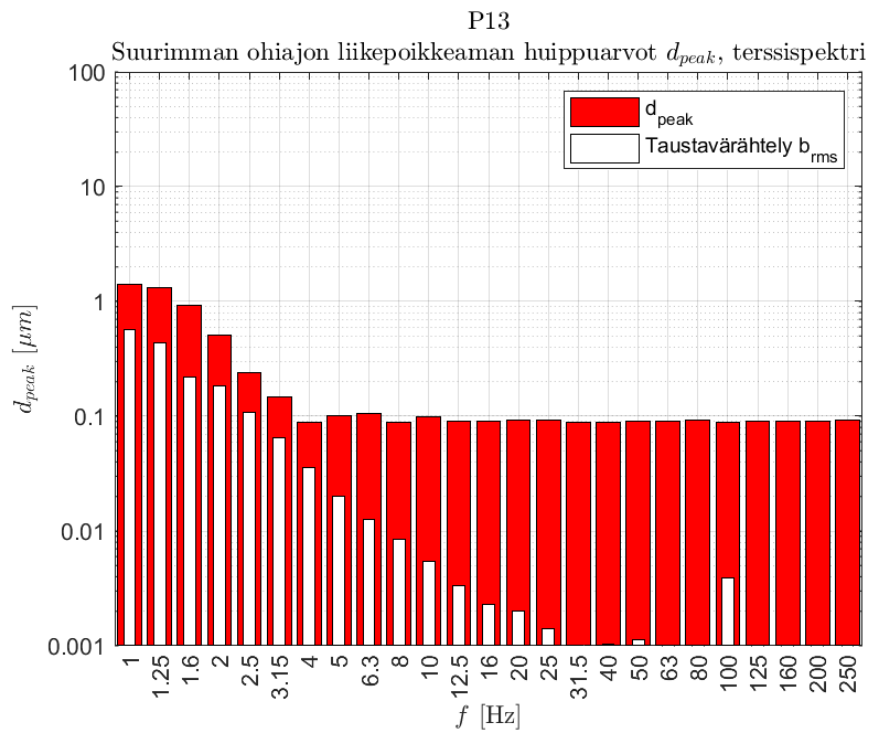
Kuva A30: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P10.



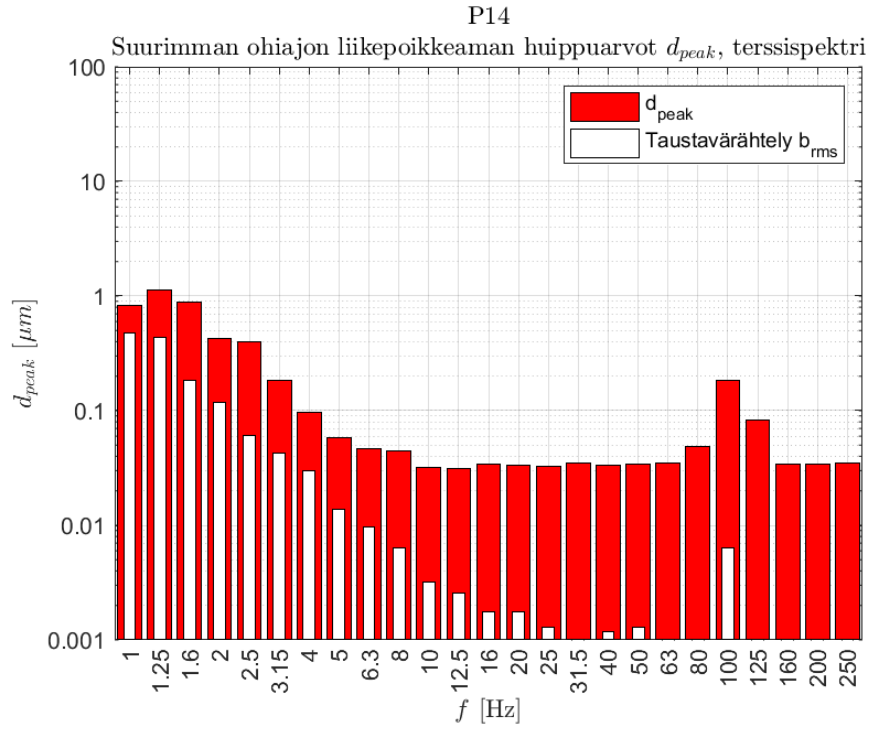
Kuva A31: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P11.



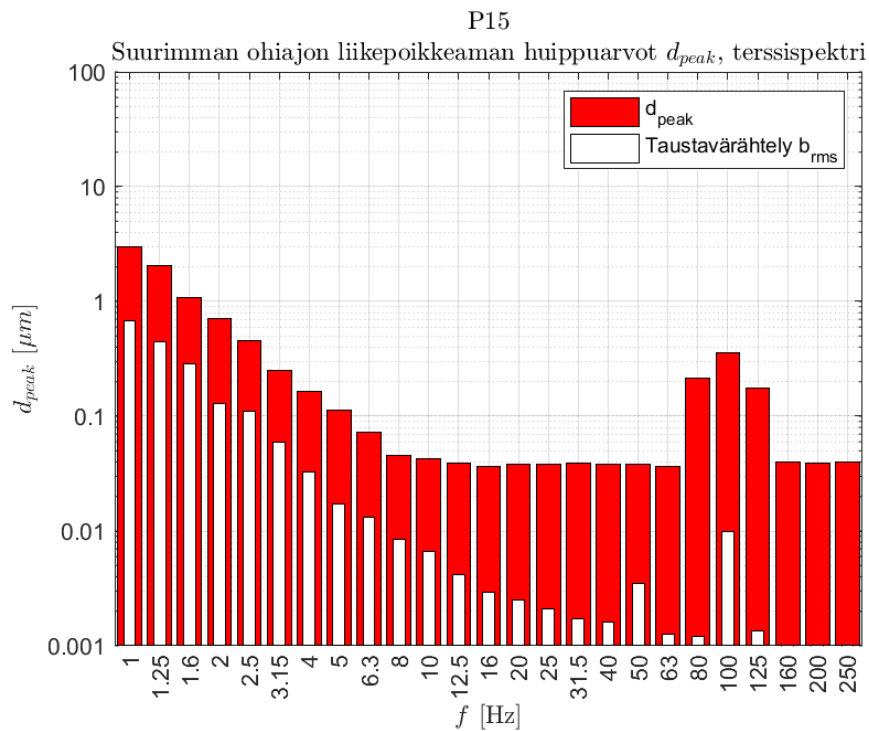
Kuva A32: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P12.



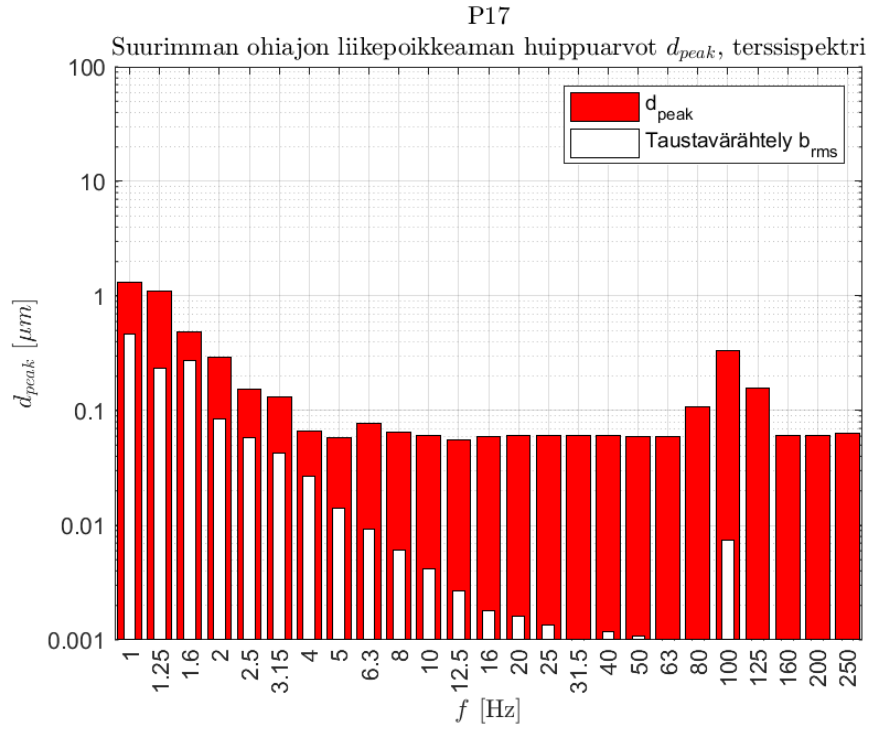
Kuva A33: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P13.



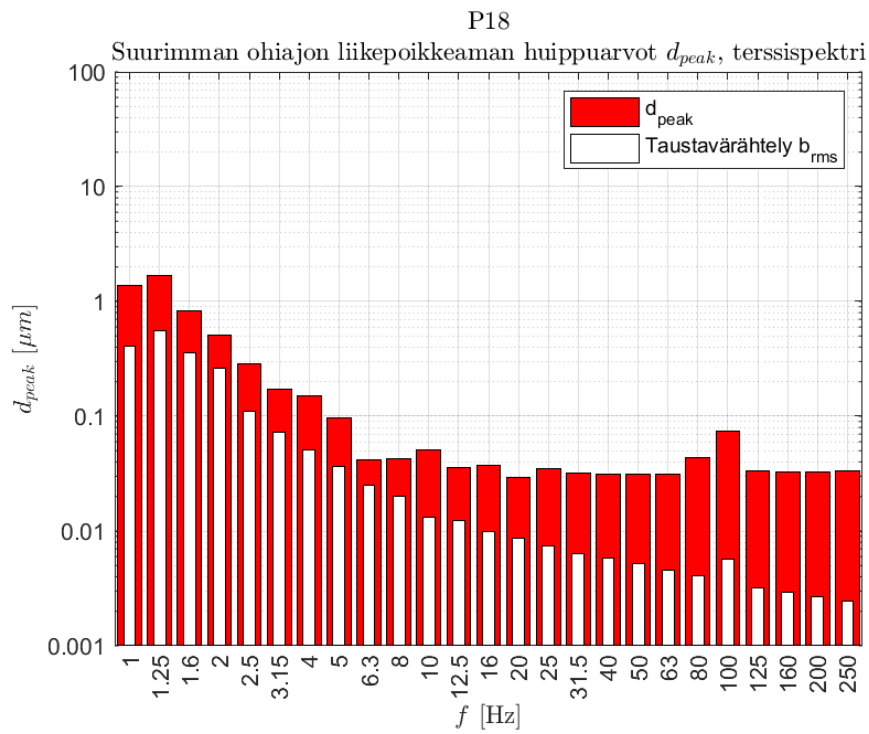
Kuva A34: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P14.



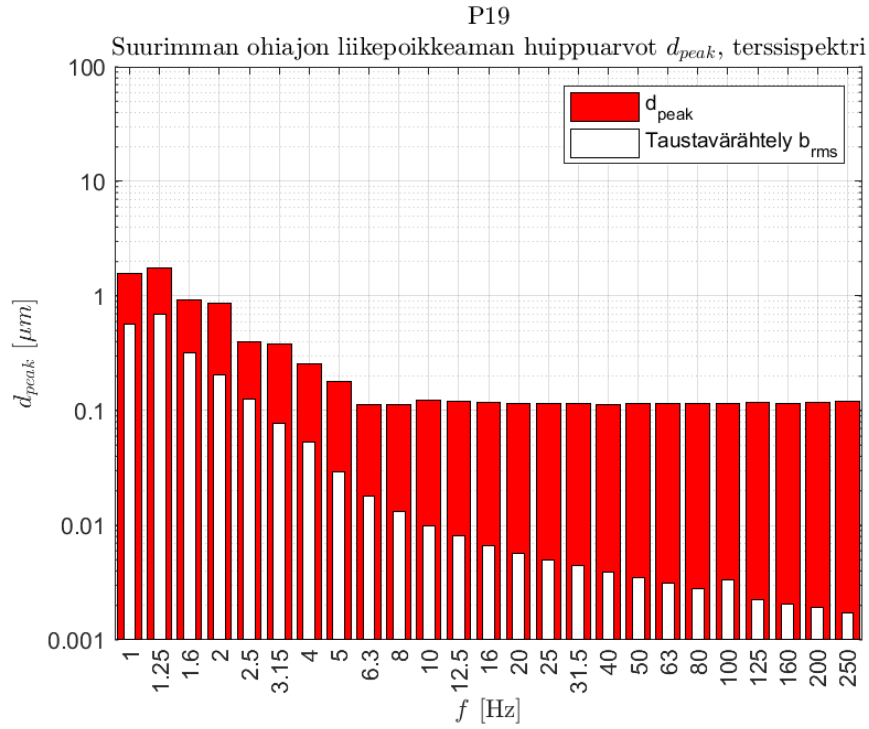
Kuva A35: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P15.



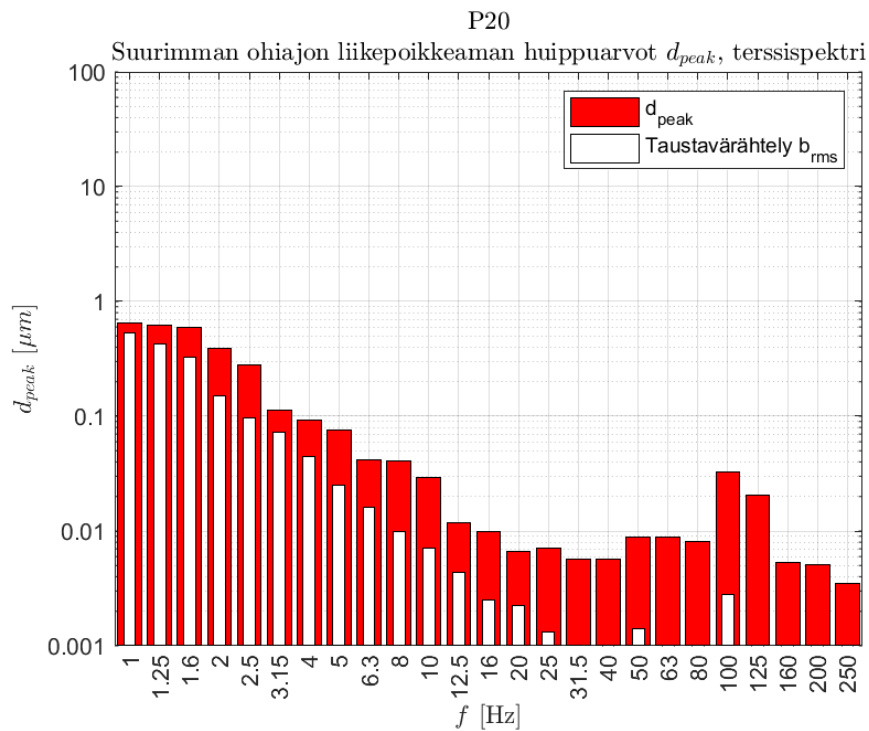
Kuva A36: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P17.



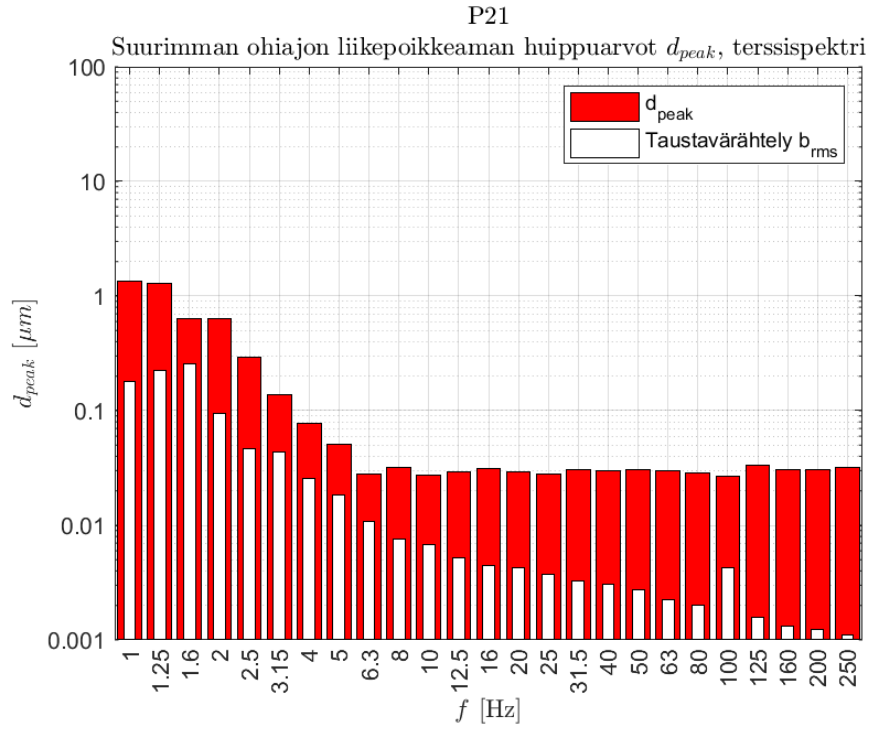
Kuva A37: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P18.



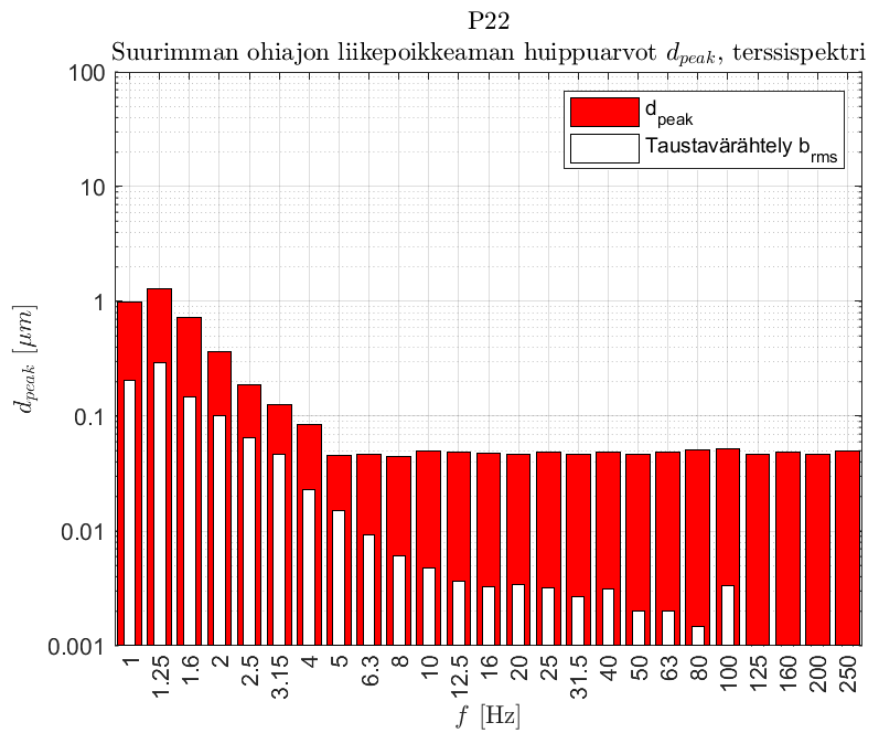
Kuva A38: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P19.



Kuva A39: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P20.

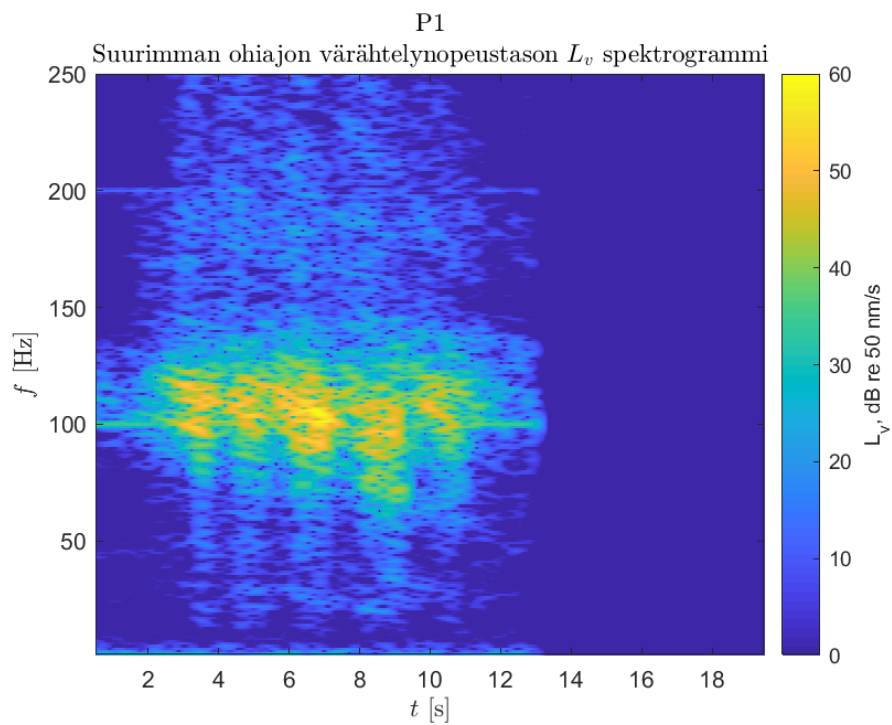


Kuva A40: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P21.

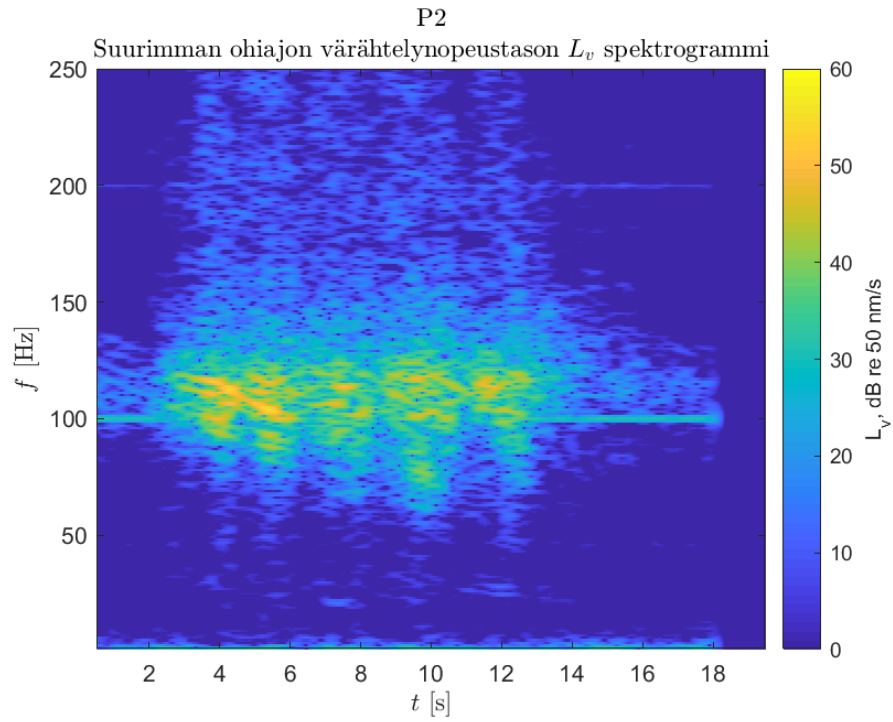


Kuva A41: Mitatut liikepoikkeaman huippuarvot terssikaistoittain suurimman ohiajon aikana mittauspisteessä P22.

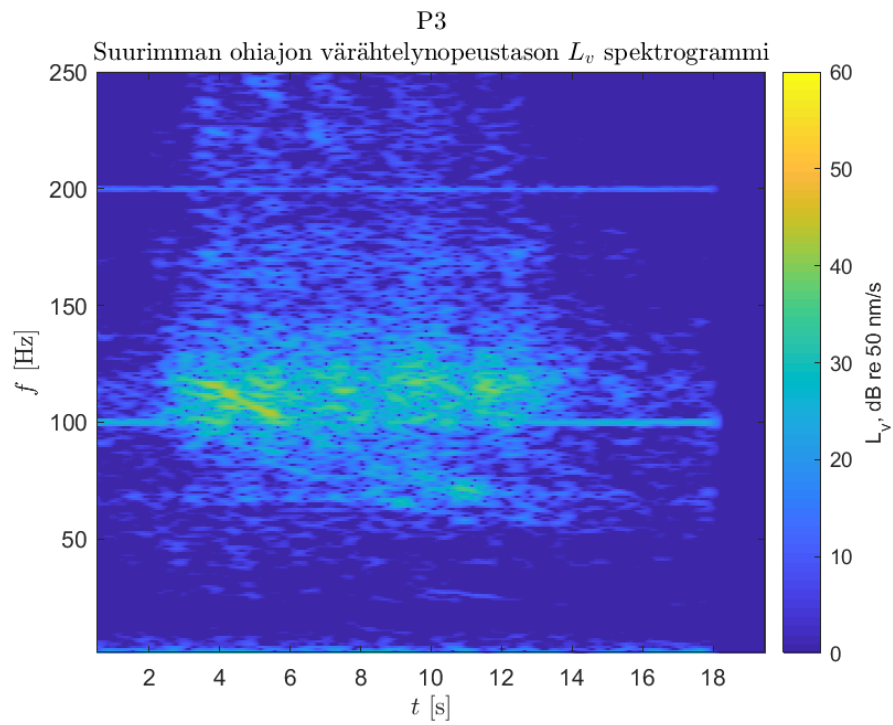
A.3 Spektrogrammit



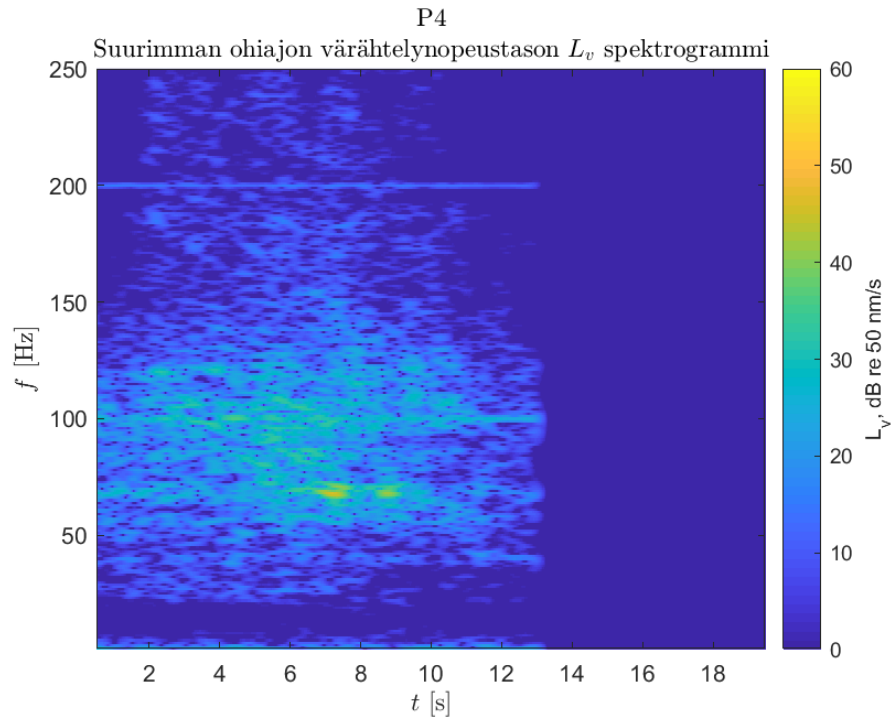
Kuva A42: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P1.



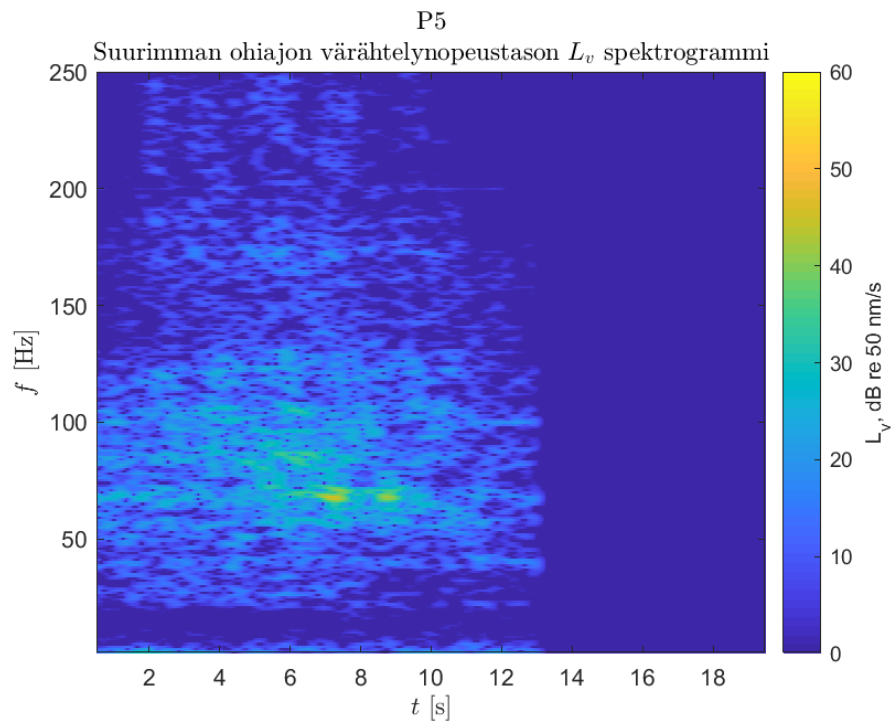
Kuva A43: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P2.



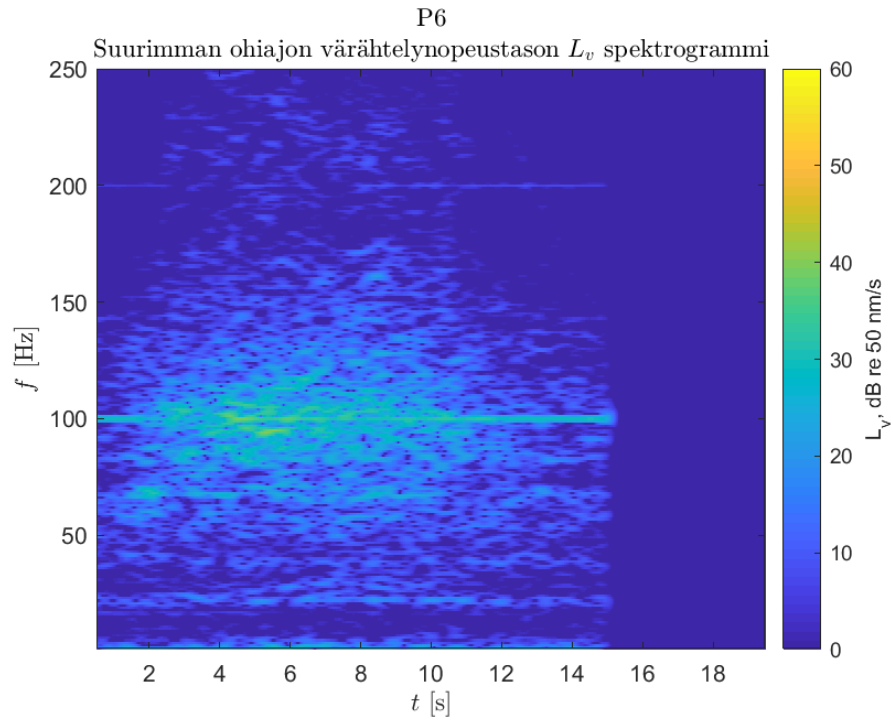
Kuva A44: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P3.



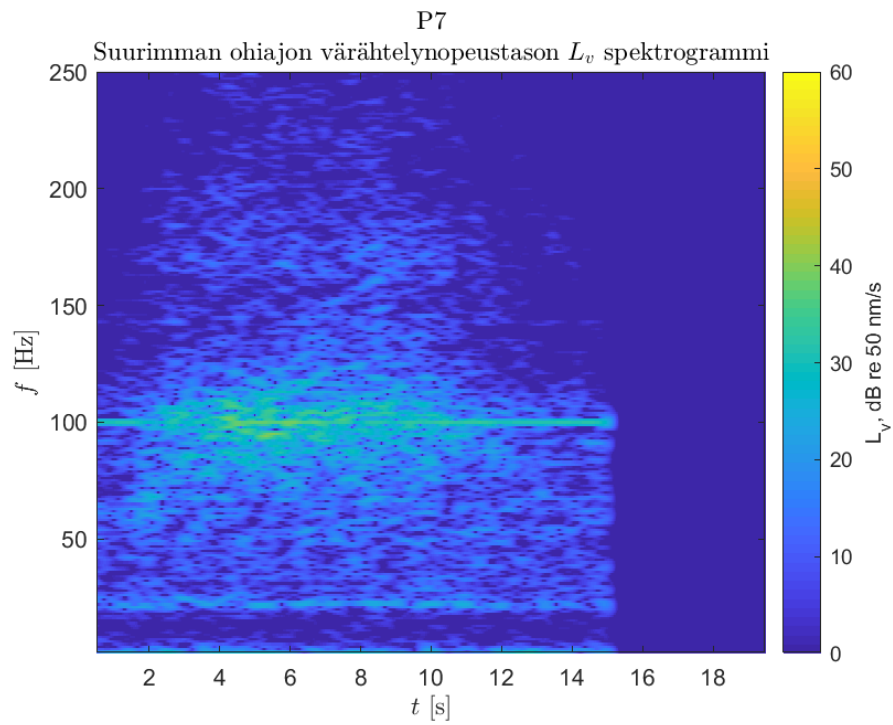
Kuva A45: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P4.



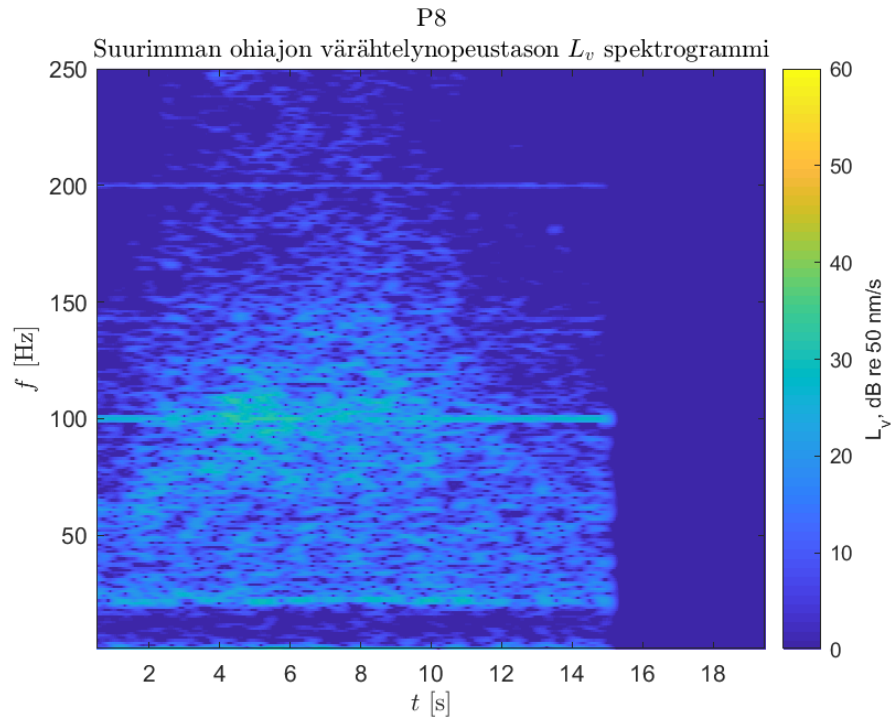
Kuva A46: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P5.



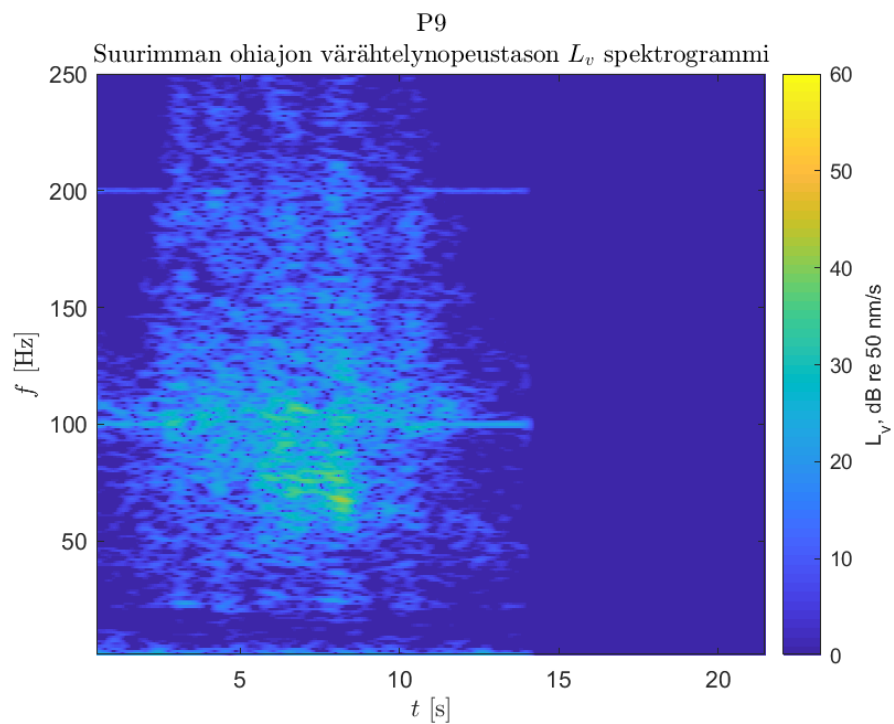
Kuva A47: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P6.



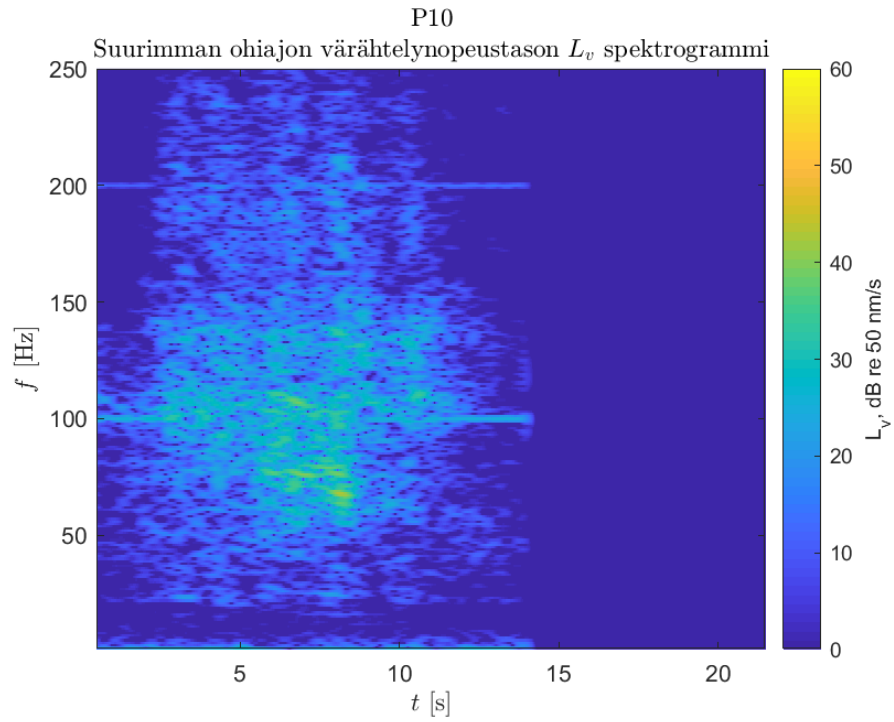
Kuva A48: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P7.



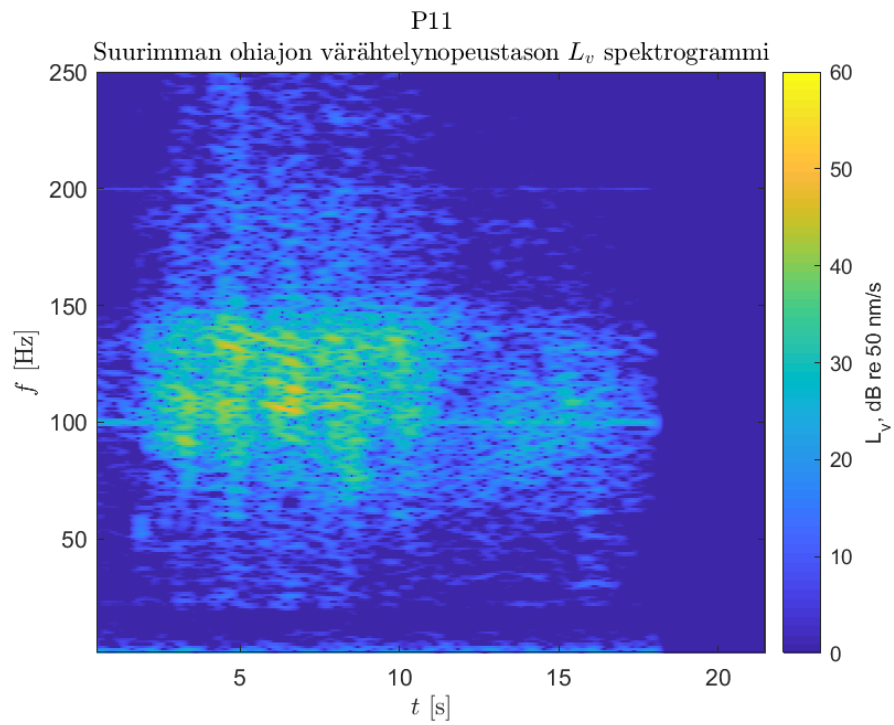
Kuva A49: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P8.



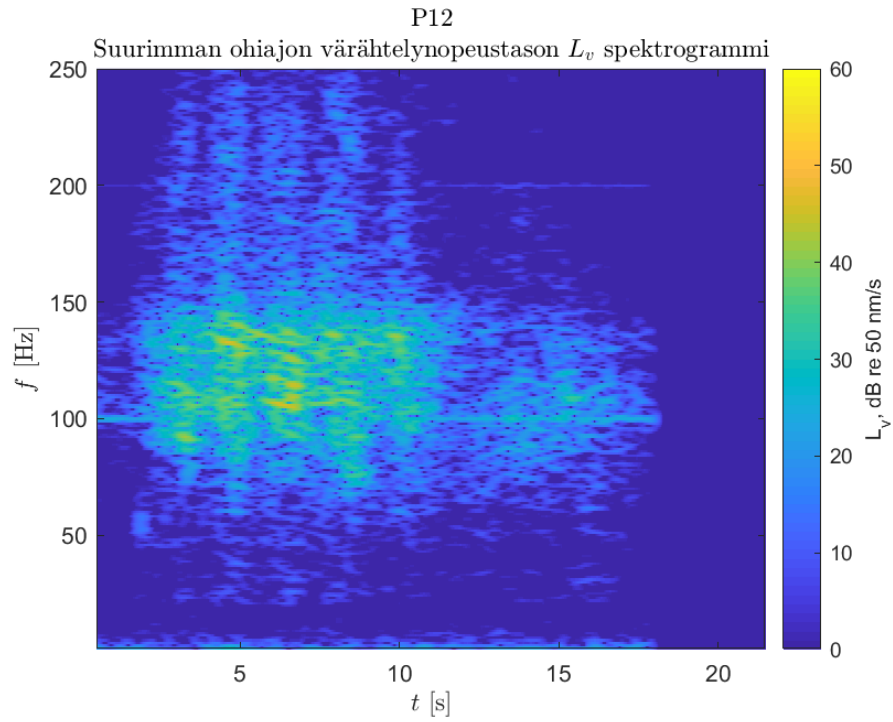
Kuva A50: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P9.



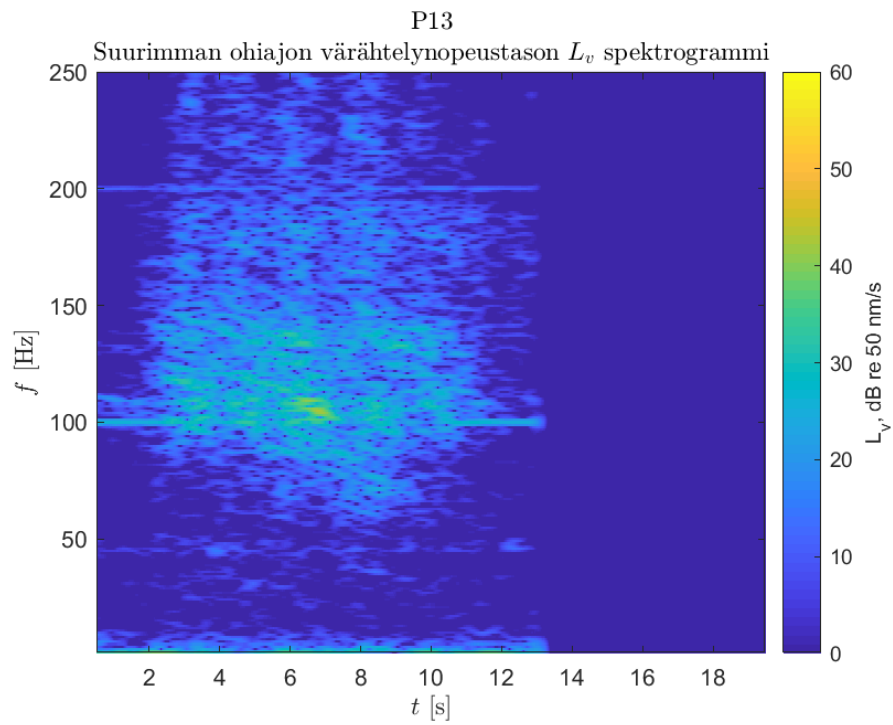
Kuva A51: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P10.



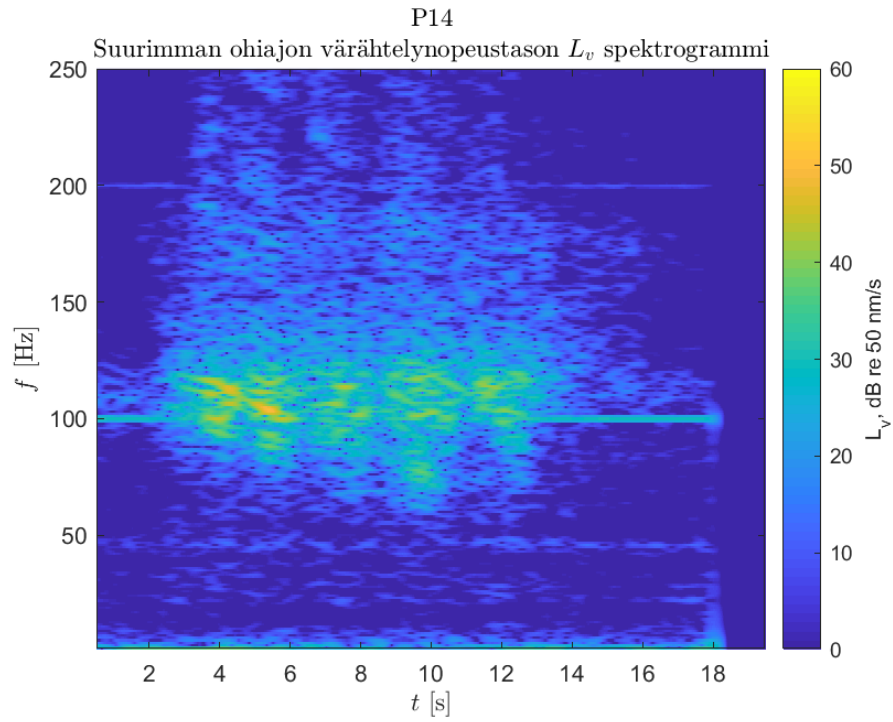
Kuva A52: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P11.



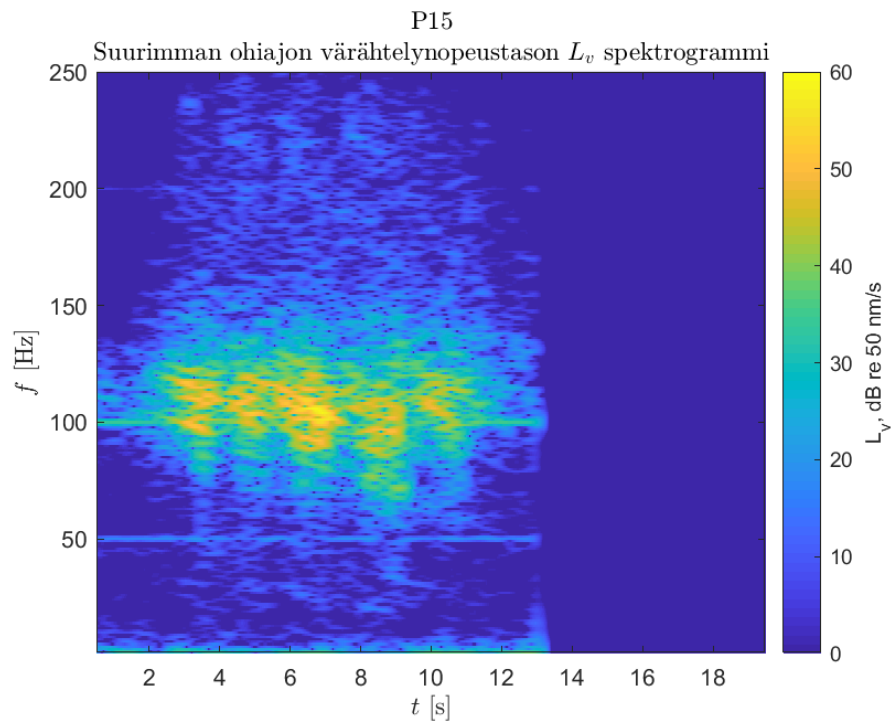
Kuva A53: Suurimman ohiajon värähtelynoipeustason spektrogrammi mittauspisteessä P12.



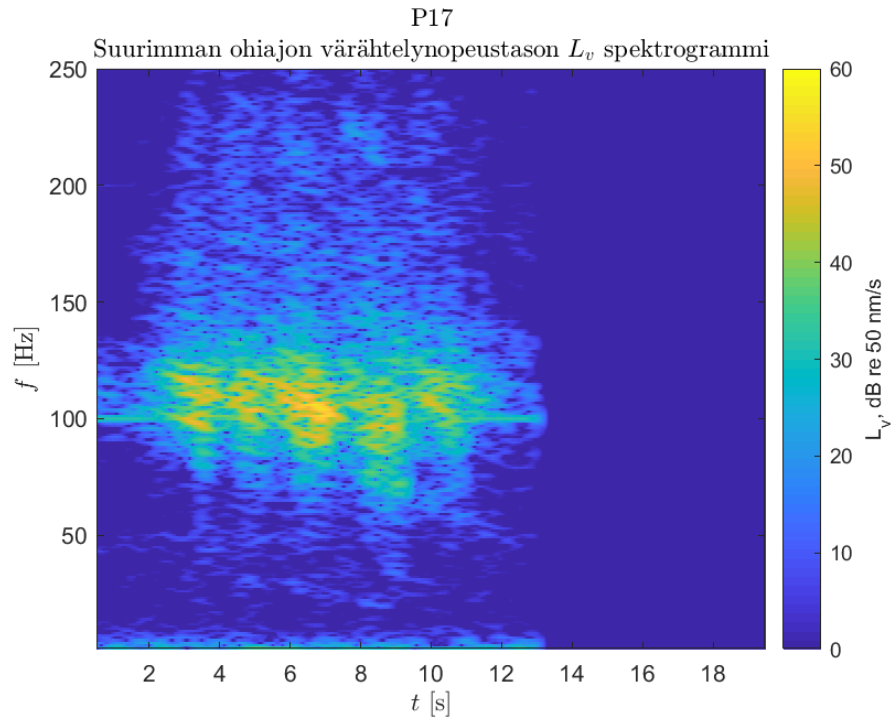
Kuva A54: Suurimman ohiajon värähtelynoipeustason spektrogrammi mittauspisteessä P13.



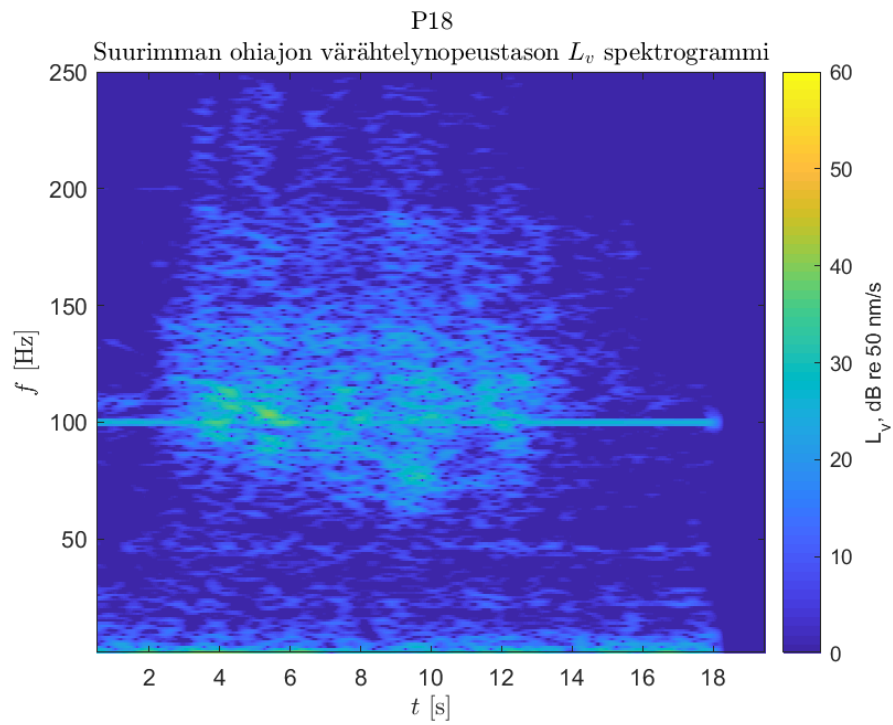
Kuva A55: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P41.



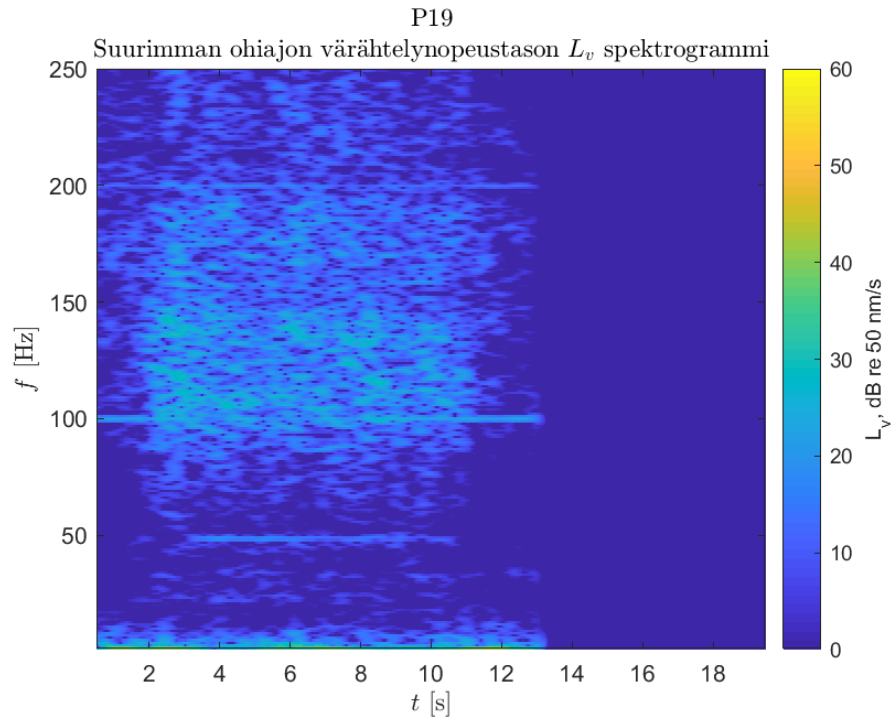
Kuva A56: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P15.



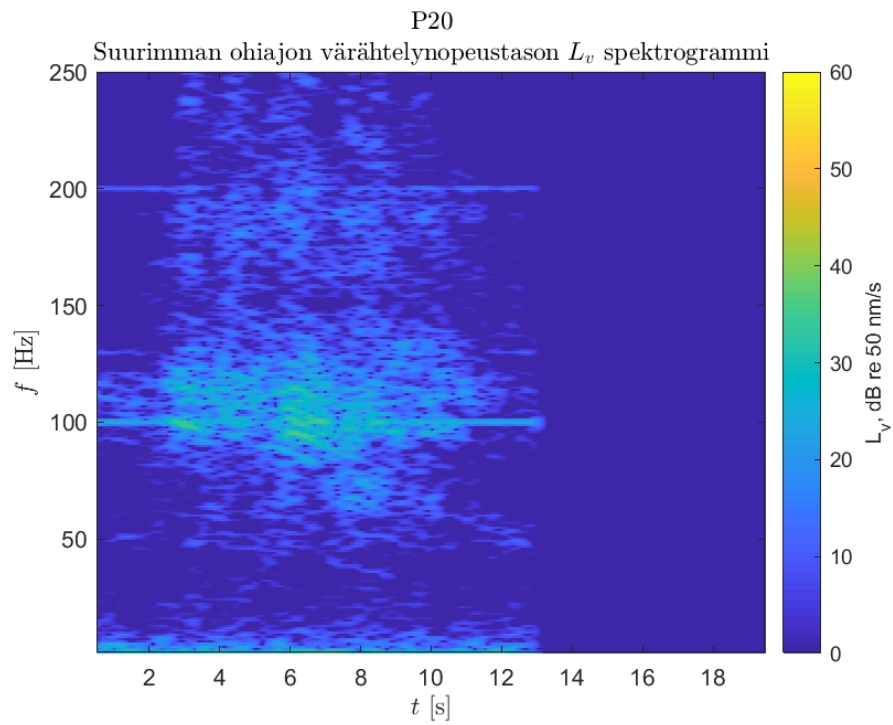
Kuva A57: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P17.



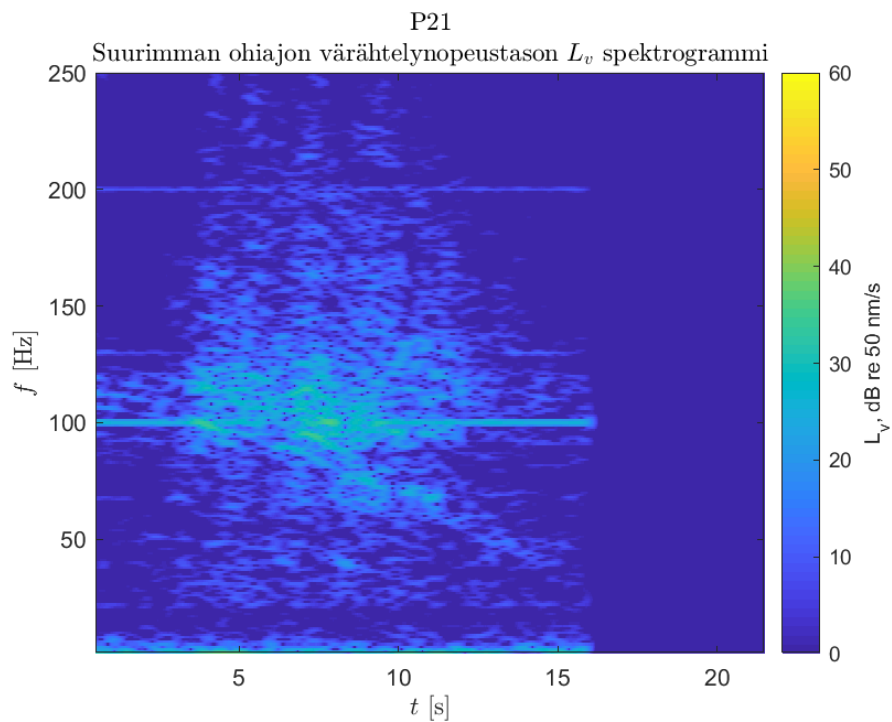
Kuva A58: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P18.



Kuva A59: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P19.



Kuva A60: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P20.



Kuva A61: Suurimman ohiajon värähtelynopeustason spektrogrammi mittauspisteessä P21.

B Mallinnusparametrit

Parameters of modal analysis taking into account static forces

Case: Modal

Analysis mode

- ☒ Modal
- ☐ Seismic
- ☐ Seismic (Pseudo-modal)

Method

- ☐ Block subspace iteration
- ☒ Sub-space iteration
- ☐ Lanczos
- ☐ Base reduction

Base definition

Parameters

Mass matrix

- ☒ Consistent
- ☐ Lumped with rotations
- ☐ Lumped without rotations

☒ Sturm check

☐ Disregard density

Parameters

Number of modes: 30

Tolerance: 0,0001

Number of iterations: 40

Acceleration: 9,80665

Damping: 0,05

☐ Include damping in calculations (according to PS92)

Percent of mass participation

- ☒ Inactive
- ☐ Active 0 (%)

Geometric Nonlinearity

- ☐ P-Delta
- ☐ Large displacements

Nonlinear analysis parameters

OK Cancel Help

Kuva B1: Moodianalyysissä käytetyt parametrit Autodesk Robot-ohjelmistossa.

Harmonic Analysis Parameters

Case: FRF

Frequency (Hz)

Initial: 1

Final: 50

Division: 250

☒ Consider eigenfrequencies from the specified range in calculations

Damping

☐ Without damping

☒ Constant: 0,05 (-)

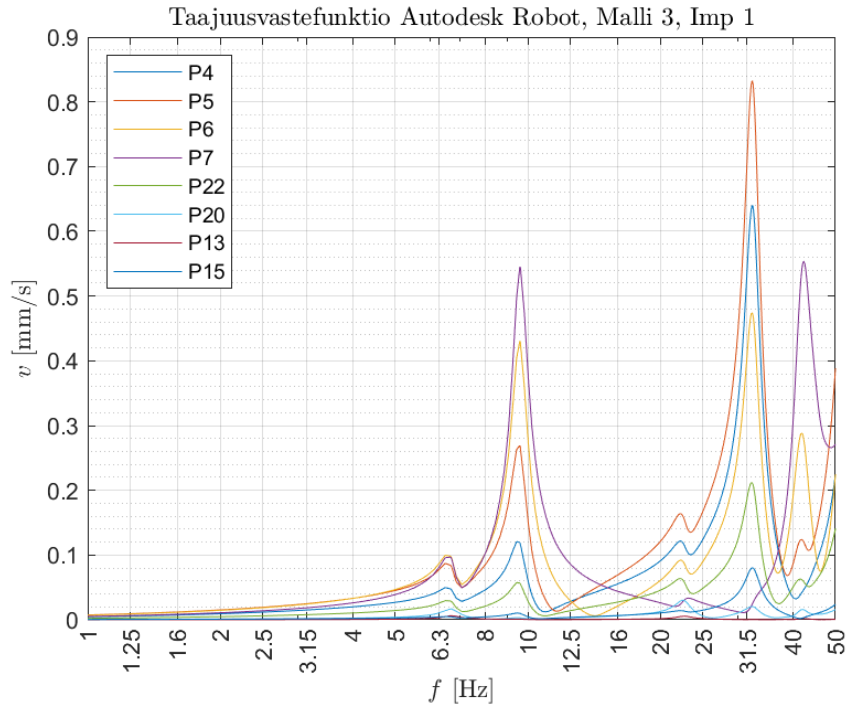
☐ Rayleigh Define

☐ Varying for each mode Define

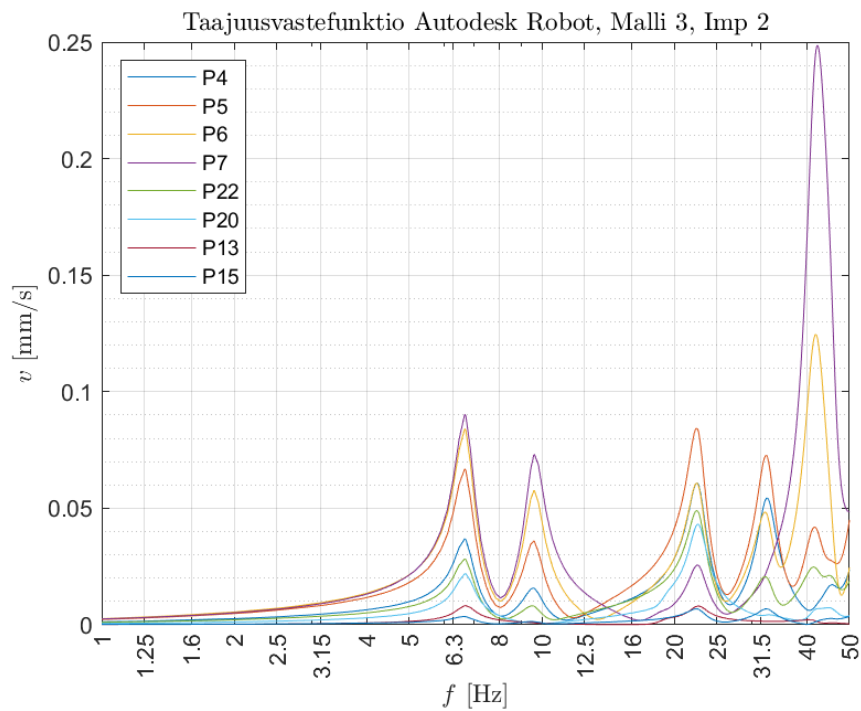
OK Cancel Help

Kuva B2: Taaajuusvastefunktiolaskuissa käytetyt parametrit Autodesk Robot-ohjelmistossa.

C Mallinnustulokset - Taajuusvastefunktiot

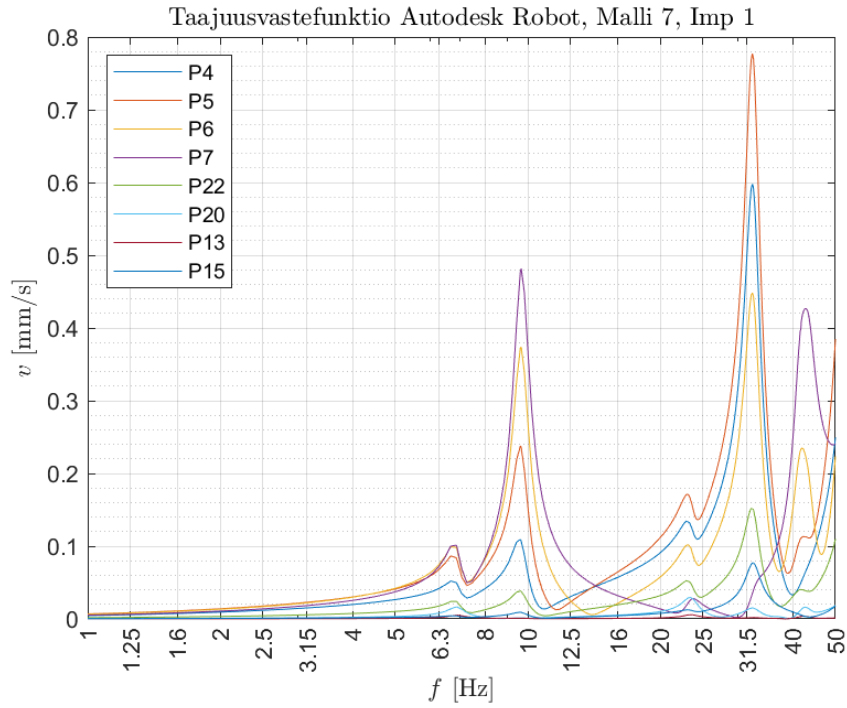


(a) Imp 1: taajuusvastefunktiot.

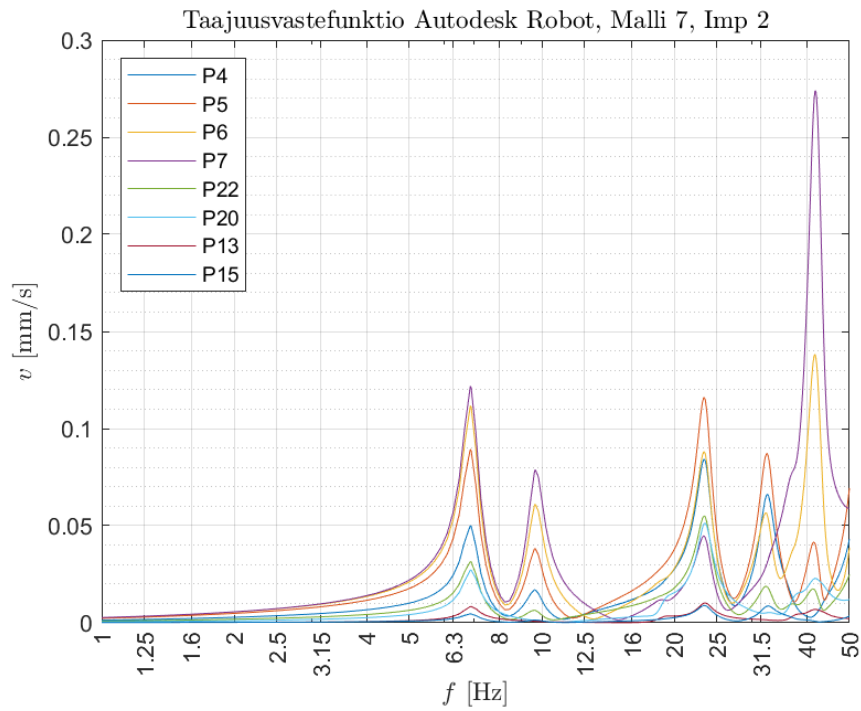


(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva B1: Mallille 3 lasketut taajuusvastefunktiot.

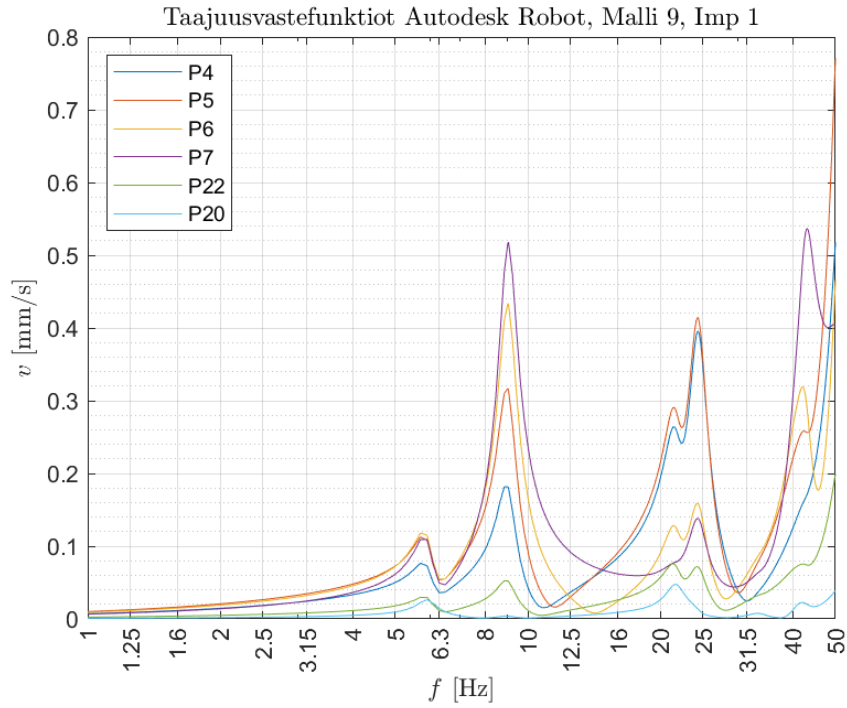


(a) Imp 1: taajuusvastefunktiot.

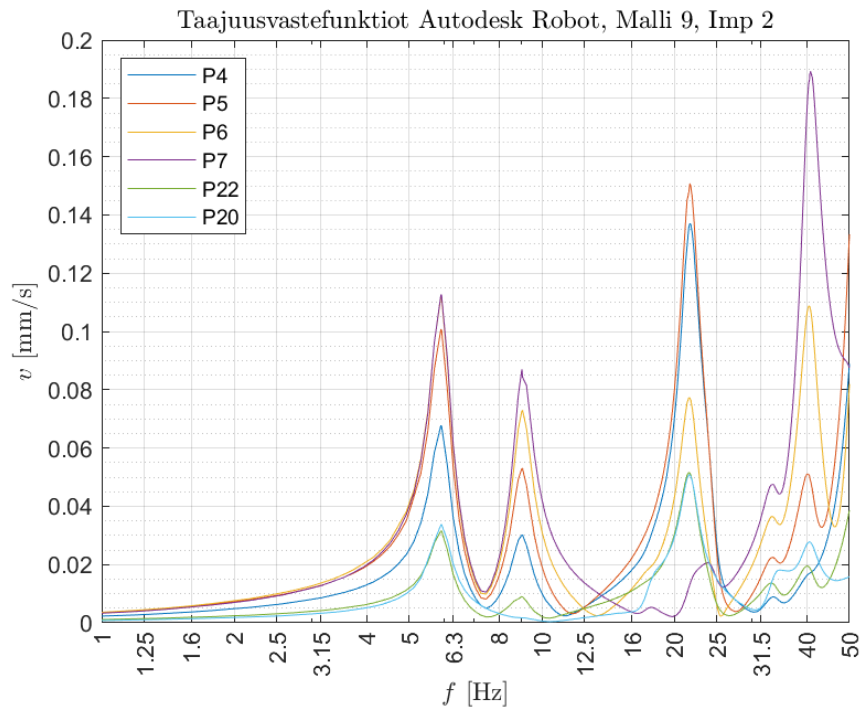


(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva B2: Mallille 7 lasketut taajuusvastefunktiot.

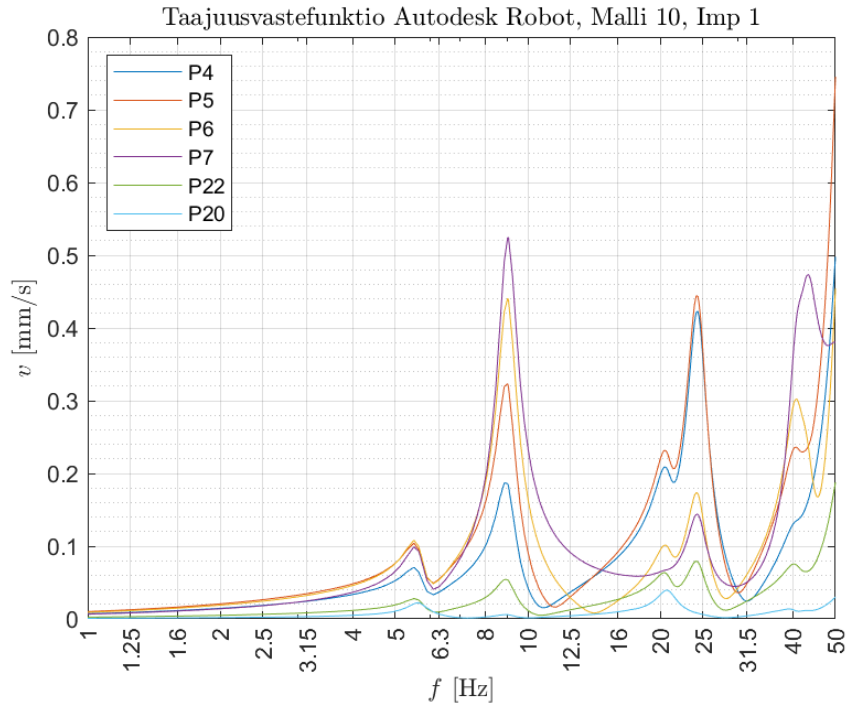


(a) Imp 1: taajuusvastefunktiot.

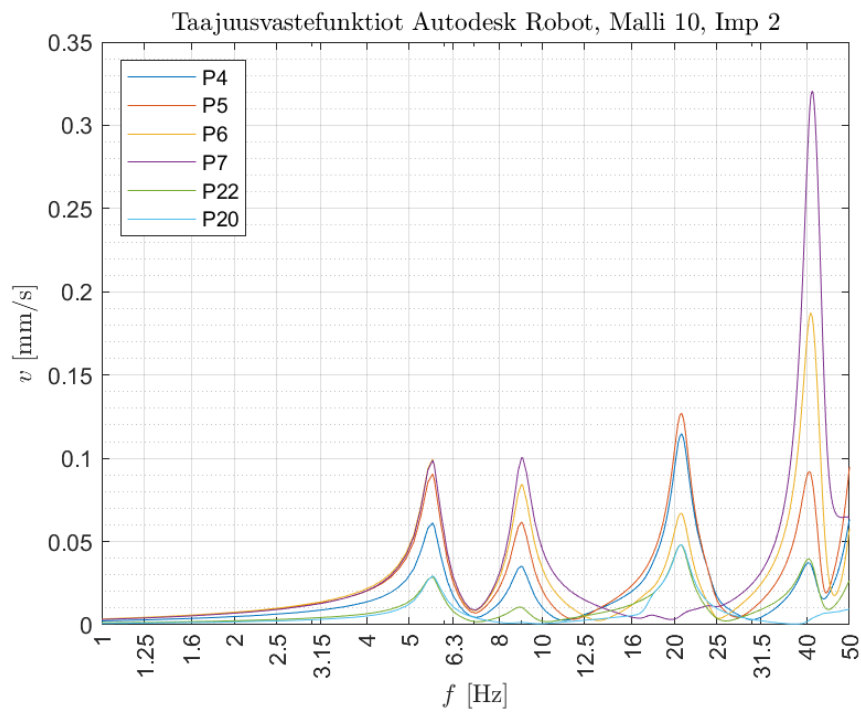


(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva B3: Mallille 9 lasketut taajuusvastefunktiot.



(a) Imp 1: taajuusvastefunktiot.



(b) Imp 2: taajuusvastefunktiot.

Kuva B4: Mallille 10 lasketut taajuusvastefunktiot.